



**M** 2018

# **MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA SALA DE AULA COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO**

**MARIA DO MAR DOS SANTOS LUÍS MACAU MARQUES**  
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ENGENHARIA CIVIL



# **MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA SALA DE AULA COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO**

**MARIA DO MAR DOS SANTOS LUÍS MACAU MARQUES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Vitor Carlos Trindade Abrantes Almeida

---

Coorientadora: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos  
Guimarães Teixeira

JUNHO DE 2018

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



[miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



[feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.



Aos meus pais,

*"Our greatest glory consists not in never falling, but in rising ever time we fall"*

*Oliver Goldsmith*



## AGRADECIMENTOS

Com o culminar desta dissertação não posso deixar de agradecer a todas as pessoas e entidades que, de uma forma ou outra, contribuíram para este trabalho.

Em primeiro lugar, uma referência especial ao distinto Professor Doutor Vitor Carlos Trindade Abrantes Almeida, pelo privilégio da sua orientação, uma inspiração na Engenharia Civil.

Gostaria de agradecer à Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães Teixeira, pela disponibilidade e apoio prestados, pelas críticas construtivas e pelos sábios conselhos que foi partilhando ao longo desta dissertação. Muito obrigada por me ter desafiado a realizar este trabalho.

À União das Freguesias de Cadoso Santiago e Mascotelos, agradeço pela cedência do espaço para realização da componente prática deste trabalho.

Ao Engenheiro Mário Roriz, pela simpatia e disponibilidade nas minhas deslocações à escola, o meu agradecimento.

À empresa *Biosafe*, em especial ao Engenheiro Rui Fernandes, agradeço ter cedido todo o material de desperdício necessário a este estudo.

Ao Engenheiro Eduardo Costa, agradeço todo o apoio e as sensatas sugestões para a implementação da solução proposta. Agradeço, em especial, o seu otimismo nos momentos menos bons.

Ao doutorando António Azevedo, o meu sincero agradecimento, por toda a disponibilidade, entusiasmo e boa disposição na realização do ensaio em laboratório.

Aos estudantes que, no âmbito do programa Civil'In, se prontificaram a deslocar à escola, ajudando e apoiando na implementação da solução proposta neste trabalho, o meu agradecimento.

À minha família, em especial aos meus pais, obrigada por terem estado sempre presentes, permitindo e apoiando todas as minhas decisões. O vosso apoio incansável e a vossa dedicação permitiram-me chegar até aqui.

Ao Diogo, por me ter apoiado e ajudado ao longo deste trabalho. Agradeço por me ter acompanhado sempre, ao longo destes cinco anos, sem nunca ter deixado de acreditar que percorreríamos este caminho juntos. Obrigada também por nunca me ter deixado desistir.

À Mariana, agradeço todo o apoio e companhia, principalmente neste último ano. Obrigada pela amizade e por estar sempre presente e disponível.

Aos meus amigos e colegas, que me acompanharam ao longo deste percurso e que proporcionam sempre momentos de descontração nas alturas mais difíceis, o meu muito obrigada.



## **RESUMO**

Pretende-se com este trabalho, proceder ao estudo de melhorias do desempenho térmico de uma sala de aula de uma escola primária do Plano dos Centenários, recorrendo a materiais de desperdício. Assim, primeiramente, realizou-se o estado de arte sobre térmica de edifícios, onde se apresentam os fenómenos térmicos que ocorrem em edifícios e a metodologia de avaliação do desempenho térmico para edifícios de comércio e serviços. De seguida, procedeu-se ao estudo dos isolamentos térmicos existentes e apresentam-se estudos térmicos a materiais de desperdício, realizados por outros autores, permitindo assim compreender as potencialidades dos diferentes materiais. Posto isto, descrevem-se as escolas primárias do Plano dos Centenários e procede-se a um levantamento das possíveis medidas de intervenção no âmbito da reabilitação térmica em edifícios escolares. Referem-se ainda as melhorias de desempenho térmico efetuadas até ao momento em salas de aula. Assim, reunidas todas as informações teóricas necessárias, procedeu-se à aplicação prática da melhoria do desempenho térmico de uma sala de aula, situada em Guimarães, pertencente ao zonamento climático, I2 e V2.

Em primeiro lugar, efetuou-se uma avaliação das condições térmicas iniciais da sala de aula, a fim de compreender as principais falhas térmicas, através da verificação do cumprimento legislativo e com recurso a instalação de sensores de temperatura e humidade relativa. Em seguida, definiu-se que a solução a implementar passaria por uma intervenção na parede em contacto com o exterior da sala de aula, assim como da porta, uma vez que se encontrava bastante degradada. Para melhorar o desempenho térmico da parede em contacto com o exterior, procuraram-se materiais de desperdício, existentes nas indústrias portuguesas, que pudessem funcionar como isolamento térmico. O material de desperdício escolhido provém da reciclagem de pneus, até agora, sem nenhum aproveitamento e foi necessário efetuar um ensaio em laboratório para definir o seu valor de condutibilidade térmica. Para o material em estudo, o valor obtido foi 0,076 W/m.K para uma massa volúmica de 208,7 kg/m<sup>3</sup>, o que se revelou um valor bastante satisfatório, pois o material apresenta-se a granel sem nenhum ligante. Relativamente à porta, o seu desempenho térmico foi melhorado através da colocação de pacotes de leite abertos que permitiram ocultar uma fissura profunda existente. Posto isto, procedeu-se à implementação das medidas apresentadas e avaliou-se o desempenho térmico final da sala.

A implementação destas medidas potenciou uma melhoria significativa do desempenho térmico da sala em estudo. Primeiramente, através da verificação da legislação vigente, concluiu-se que o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento da sala diminuiu relativamente ao inicialmente verificado. Posteriormente, através da análise gráfica dos dados recolhidos pelos sensores, foi possível verificar que o tempo de dissipação do calor na sala aumentou cerca de 18 vezes em relação à situação inicial nos dias em que a sala foi aquecida. Assim, a realização do presente trabalho permitiu concluir que as medidas implementadas possibilitaram a melhoria do desempenho térmico da sala de aula, sem custos, utilizando materiais que eram tidos como desperdícios.

**PALAVRAS-CHAVE:** desempenho térmico, materiais de desperdício, edifícios escolares, isolamento térmico, reabilitação térmica



## **ABSTRACT**

The aim of this work is to study the improvements of the thermal performance of a primary school classroom of the “Plano dos Centenários”, using waste materials. So, first, the state of art about thermics of buildings was conducted, showing the thermal phenomena that occur in buildings and services. Then, the study of existing thermal insulation was carried out and thermal studies on waste material by other authors were presented, thus enabling the understanding of the potentialities of the different materials. Hereupon, the primary schools of the “Plano dos Centenários” are described and a survey of possible intervention measures concerning thermal rehabilitation in school buildings was conducted. There are also references to the recent thermal performance improvements in classrooms. Thus, having gathered all the necessary theoretical information, the practical application of the improvement of the thermal performance of a classroom, located in Guimarães, belonging to the climatic zoning, I2 and V2, was carried out.

Firstly, an evaluation of the initial thermal conditions of the classroom was carried out, in order to understand the main thermal faults, by fulfilling the legislation and installing temperature and relative humidity sensors. Secondly, it was decided that the solution would be an intervention not only on the wall next to the exterior of classroom, but also on the door, since it was quite degraded. In order to improve the thermal performance of the wall next to the exterior, we searched for waste materials, existing in Portuguese industries, which could be used as thermal insulation. The waste material which was chosen comes from recycled tires which has not yet been used and it was necessary carry out a laboratory test to define its thermal conductivity value. For the material under study the value obtained was 0,076 W/m.K for a density of 208,7 kg/m<sup>3</sup> which proved to be a very satisfactory value, since the materials is presented in bull without any binder. Regarding the door, its thermal performance was improved by the placement of open milk packages that allowed hiding an existing deep fissure. After this, the measures presented were implemented and the final thermal performance of the room was evaluated.

The implementation of these measures led to a significant improvement in the thermal performance of the room being studied. Firstly, by verification the current legislation, it was concluded that the value of nominal annual need of energy useful for heating the room decreased compared to the initially verified. Later, through the graphical analysis of the data collected by the sensors, it was possible to verify that the time of dissipation of the heat in the room increased possible to verify that the time of dissipation of the heat in the room increased about 18 times compared to the initial situation when the room was heated. Thus, the accomplishment of the present work allowed the conclusion that the measures implemented permitted to improvement of the thermal performance of the classroom without costs, using materials that were considered as waste.

**KEYWORDS:** thermal performance, waste materials, school buildings, thermal insulation, thermal rehabilitation





## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENQUADRAMENTO .....	1
1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS .....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2. TÉRMICA DE EDIFÍCIOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. NOÇÕES TEÓRICAS BÁSICAS .....	3
2.1.1. INTRODUÇÃO .....	3
2.1.2. MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR .....	4
2.1.3. TROCAS DE CALOR EM EDIFÍCIOS .....	5
2.1.3.1. Introdução .....	5
2.1.3.2. Trocas de calor por condução através da envolvente .....	7
2.1.3.3. Trocas de calor por renovação do ar .....	9
2.1.3.4. Ganhos solares através dos envidraçados .....	11
2.1.4. GANHOS INTERNOS .....	12
2.1.5. INÉRCIA TÉRMICA .....	13
2.2. REGULAMENTAÇÃO NO ÂMBITO DA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS.....	14
2.2.1. DISPOSIÇÕES GERAIS.....	14
2.2.2. REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS.....	16
2.2.2.1. Generalidades .....	16
2.2.2.2. Zonamento Climático .....	16
2.2.2.3. Metodologia do RECS.....	18
2.3. RESUMO DO CAPÍTULO .....	27

<b>3. ISOLAMENTOS TÉRMICOS .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1. SELEÇÃO EXIGENCIAL DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS .....</b>	<b>29</b>
3.1.1. INTRODUÇÃO .....	29
3.1.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS .....	29
3.1.3. CARACTERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS.....	30
3.1.4. CERTIFICAÇÃO DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS .....	31
3.1.4.1. Introdução.....	31
3.1.4.2. Compressibilidade – I .....	32
3.1.4.3. Estabilidade dimensional – S .....	32
3.1.4.4. Comportamento à água líquida – O .....	33
3.1.4.5. Comportamento mecânico – L .....	33
3.1.4.6. Permeabilidade ao vapor de água – E .....	34
<b>3.2. ISOLAMENTOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS .....</b>	<b>35</b>
3.2.1. INTRODUÇÃO .....	35
3.2.2. LÃ DE ROCHA .....	36
3.2.3. LÃ DE VIDRO .....	37
3.2.4. ARGILA EXPANDIDA .....	38
3.2.5. BETÃO CELULAR.....	38
3.2.6. BETÃO COM INERTES LEVES DE ARGILA EXPANDIDA .....	39
3.2.7. CORTIÇA EXPANDIDA .....	40
3.2.8. POLIESTIRENO EXPANDIDO MOLDADO (EPS) .....	41
3.2.9. POLIESTIRENO EXPANDIDO EXTRUDIDO (XPS) .....	41
3.2.10. POLIURETANO.....	42
<b>3.3. ISOLAMENTOS TÉRMICOS INOVADORES.....</b>	<b>43</b>
3.3.1. INTRODUÇÃO .....	43
3.3.2. INOVAÇÃO DE MATERIAIS DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS.....	43
3.3.2.1. Lã de rocha projetada.....	43
3.3.2.2. Blocos de argila expandida .....	44
3.3.2.3. Blocos de betão celular autoclavado.....	44
3.3.2.4. EPS com grafite.....	45
3.3.2.5. Poliuretano projetado ou injetado.....	45
3.3.3. ISOLAMENTOS TÉRMICOS COM MATERIAIS INOVADORES.....	46
3.3.3.1. Aerogel de sílica .....	46

3.3.3.2. Painel de isolamento a vácuo (VIP) .....	47
3.3.3.3. Proteção térmica refletora de baixa emissividade .....	48
<b>3.4. ISOLAMENTOS TÉRMICOS COM MATERIAIS SUSTENTÁVEIS .....</b>	<b>49</b>
3.4.1. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS .....	49
3.4.2. ESTUDO DE DESEMPENHO TÉRMICO COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO .....	53
<b>3.5. RESUMO DO CAPÍTULO .....</b>	<b>56</b>
 <b>4. EDIFÍCIOS ESCOLARES .....</b>	 <b>61</b>
<b>4.1. ESCOLAS PRIMÁRIAS DO PLANO DOS CENTENÁRIOS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.2. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES .....</b>	<b>65</b>
4.2.1. INTRODUÇÃO .....	65
4.2.2. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE PAREDES EXTERIORES .....	67
4.2.2.1. Introdução .....	67
4.2.2.2. Isolamento térmico aplicado pelo exterior .....	67
4.2.2.3. Isolamento térmico aplicado pelo interior .....	68
4.2.2.4. Isolamento térmico aplicado na caixa-de-ar de paredes duplas .....	69
4.2.3. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE COBERTURAS .....	70
4.2.4. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE PAVIMENTOS .....	72
4.2.4.1. Introdução .....	72
4.2.4.2. Isolamento térmico inferior .....	72
4.2.4.3. Isolamento térmico superior .....	73
4.2.4.4. Isolamento térmico intermédio .....	74
4.2.5. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS .....	74
4.2.6. OUTRAS MEDIDAS .....	75
<b>4.3. MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO EM SALAS DE AULA .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4. RESUMO DO CAPÍTULO .....</b>	<b>83</b>
 <b>5. CASO DE ESTUDO .....</b>	 <b>87</b>
<b>5.1. ESCOLA EB1 DE CANDOSO SANTIAGO .....</b>	<b>87</b>
<b>5.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>92</b>
<b>5.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO INICIAL .....</b>	<b>95</b>
5.3.1. INTRODUÇÃO .....	95
5.3.2. ZONAMENTO CLIMÁTICO .....	95

5.3.3. VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO LEGISLATIVO.....	96
5.3.4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	100
<b>5.4. PROPOSTA DE MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO .....</b>	<b>104</b>
5.4.1. AVALIAÇÃO DO MATERIAL DE DESPERDÍCIO .....	104
5.4.2. MATERIAL DE DESPERDÍCIO PROPOSTO .....	106
5.4.3. IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA .....	109
<b>5.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO FINAL .....</b>	<b>114</b>
5.5.1. INTRODUÇÃO .....	114
5.5.2. VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO LEGISLATIVO.....	114
5.5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	116
<b>5.6. RESUMO DO CAPÍTULO .....</b>	<b>118</b>
 <b>6. CONCLUSÕES .....</b>	 <b>121</b>
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	121
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	123
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>125</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Mecanismos de transmissão de calor (adaptado de [2]).....	4
Figura 2.2- Balanço térmico em edifícios a estação de aquecimento .....	6
Figura 2.3- Balanço térmico em edifícios na estação de arrefecimento .....	7
Figura 2.4- Transmissão de calor através de um elemento de construção na estação de aquecimento .....	8
Figura 2.5- Linhas de fluxo de calor em casos típicos de pontes térmicas .....	8
Figura 2.6- Elemento envidraçado sob a ação da radiação solar (adaptado de [1]) .....	11
Figura 2.7- Zonas climáticas de inverno no continente [17] .....	17
Figura 2.8- Zonas climáticas de verão no continente [17] .....	17
Figura 3.1- Lã de rocha em rolo [25] .....	36
Figura 3.2- Lã de rocha em painéis [26] .....	36
Figura 3.3- Lã de vidro em rolo [27] .....	37
Figura 3.4- Lã de vidro em painéis [28].....	37
Figura 3.5- Argila expandida a granel [29] .....	38
Figura 3.6- Betão Celular formado <i>in situ</i> [31] .....	39
Figura 3.7- Betão com inertes de argila expandida [33,34] .....	40
Figura 3.8- Grânulos de cortiça expandida [36] .....	40
Figura 3.9- Aglomerado de cortiça expandida [37] .....	40
Figura 3.10- Poliestireno expandido moldado [38].....	41
Figura 3.11- Poliestireno expandido extrudido [39].....	42
Figura 3.12- Poliuretano em placa [40] .....	42
Figura 3.13- Painéis sanduíche [41] .....	42
Figura 3.14- Lã de Rocha projetada [43] .....	43
Figura 3.15 – Bloco térmico de argila expandida [45].....	44
Figura 3.16 – Forra térmica de argila expandida e XPS [46].....	44
Figura 3.17 – Bloco de Betão Celular Autoclavado [48] .....	45
Figura 3.18 – EPS com grafite em placas [51].....	45
Figura 3.19- Poliuretano projetado e injetado [53,54] .....	46
Figura 3.20- Manta flexível de aerogel [59].....	47
Figura 3.21 – Painel de isolamento a vácuo [61] .....	47
Figura 3.22- Proteção térmica refletora de baixa emissividade [64].....	48
Figura 3.23- Resíduos por setor na União Europeia (adaptado de [68]) .....	50

Figura 3.24- Corte de solas a laser na empresa Atlanta [75].....	52
Figura 3.25- WFW (Woven fabric waste) [87] .....	54
Figura 3.26- WFS (Woven fabric subwaste) [87] .....	54
Figura 3.27 – Painéis feitos de algodão (esquerda) e de ganga (direita) reciclados [77].....	55
Figura 3.28- Fibra de celulose projetada [95].....	56
Figura 4.1- Escola de Milhões, Bragança – tipo Xisto (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971).....	62
Figura 4.2 – Escola masculina de Terroso, São Salvador, Póvoa de Varzim, Porto – tipo Douro Granito (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971) .....	62
Figura 4.3 – Escola de Ordem, Marinha Grande, Leiria – Edifício gémeo – tipo Estremadura (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar).....	63
Figura 4.4 – Escola de Rua, Arrifana, Feira, Aveiro – tipo Minho Granito (Arquivo Delegação para as Obras de Construção de Escolas Primárias) .....	63
Figura 4.5 – Escola masculina n.º 3 de Vila do Conde, Porto- tipo Douro Granito (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971) .....	63
Figura 4.6- Escola de Fontes, Santa Marta de Penaguião, Vila Real – Edifício gémeo – tipo Xisto (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1972) .....	63
Figura 4.7 – Escola de Mourisca do Vouga, Águeda, Aveiro – tipo Urbano (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar) .....	64
Figura 4.8 – Escola de Silveirinha, Ribeira Seca, Calheta (Ilha de São Jorge) – tipo Rural (Arquivo Direção-Geral das Construção Escolares).....	64
Figura 4.9 – Aplicação de isolamento térmico pelo exterior: sistema ETICS [104] .....	68
Figura 4.10- Aplicação de isolamento térmico pelo interior: colocação de painéis de isolamento prefabricados fixados contra a parede [106] .....	69
Figura 4.11 – Aplicação de isolamento térmico em caixa-de-ar: injeção de espuma isolante [108] ....	69
Figura 4.12- Desvão útil: Isolamento térmico aplicado ao longo das vertentes, em posição inferior, ou seja, sob as varas [103].....	70
Figura 4.13- Desvão não útil: Isolamento térmico aplicado na esteira do teto em posição superior [103] .....	71
Figura 4.14 – Cobertura invertida e cobertura tradicional [110].....	72
Figura 4.15- Pavimento sobre espaço exterior ou não aquecido: Isolamento térmico inferior [103]....	73
Figura 4.16- Pavimento sobre espaço exterior ou não aquecido: isolamento térmico superior [103] ..	73
Figura 4.17- Exemplos de proteções solares exteriores [103].....	75
Figura 4.18 – Cronograma do Programa de Modernização do Parque Escolar [114].....	76
Figura 4.19- Escola Secundária de Montemor-o-Velho antes (esquerda) e depois (direita) da intervenção da Parque Escolar [117] .....	80
Figura 4.20- Instalação de AVAC da Parque Escolar pelo exterior em escolas reabilitadas [121] .....	82

Figura 5.1 - Fachada principal do edifício .....	87
Figura 5.2 – Edifício do refeitório .....	87
Figura 5.3 – Campo de basquetebol, coberto e acrescento ao edifício principal .....	88
Figura 5.4 – Campo de futebol e acrescento ao edifício principal .....	88
Figura 5.5 – Sala de aula: vista do exterior .....	88
Figura 5.6 – Sala de aula: vista do interior .....	88
Figura 5.7 - Grelhas de ventilação .....	89
Figura 5.8 - Porta de entrada da sala de aula .....	89
Figura 5.9 - Planta do Rés-do-Chão da escola (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	89
Figura 5.10 – Planta do Piso 1 da escola (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	90
Figura 5.11 – Alçado principal (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	90
Figura 5.12- Alçado posterior (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	91
Figura 5.13 – Alçado lateral esquerdo (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	91
Figura 5.14 – Alçado lateral direito (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	91
Figura 5.15 – Placa de isolamento inserida na sala de aula [125] .....	92
Figura 5.16 – Sensor utilizado (Hobo Temp/RH 2,5% Data Logger) [127] .....	93
Figura 5.17 – Equipamento “CT-Mètre” com sonda “Anneau” .....	94
Figura 5.18 - Representação do pavimento .....	98
Figura 5.19 – Identificação dos elementos construtivos – Corte do alçado principal (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	99
Figura 5.20- Identificação dos elementos construtivos – Corte do alçado lateral esquerdo (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	99
Figura 5.21- Localização do sensor exterior .....	101
Figura 5.22 – Posição inicial dos sensores (elaborado com recurso ao <i>software Revit</i> ) .....	101
Figura 5.23- Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 7 de março .....	102
Figura 5.24- Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 12 de março .....	103
Figura 5.28 – Material de desperdício utilizado no estudo .....	106
Figura 5.29 – Moldes de cartão com película aderente .....	107
Figura 5.30 - Molde de cartão com película aderente e material (amostras a ensaiar) .....	107
Figura 5.31 – Pontos de ancoragem .....	110
Figura 5.32 – Tela para solo .....	110
Figura 5.33 – Matriz de pontos de ancoragem (elaborado com recurso ao <i>software AutoCAD</i> ) .....	110
Figura 5.34 – Corte esquemático da proposta (elaborado com recurso ao <i>software AutoCAD</i> ) .....	111
Figura 5.35 – Aspeto dos pontos de ancoragem caídos .....	111

Figura 5.36 – Solução aplicada com pregos de ancoragem .....	112
Figura 5.37 – Enchimento das almofadas .....	113
Figura 5.38 – Almofadas finalizadas .....	113
Figura 5.39 – Pormenor da instalação .....	113
Figura 5.40 – Solução final implementada .....	113
Figura 5.41 – Esquema de montagem final (elaborado com recurso ao <i>software AutoCAD</i> ) .....	113
Figura 5.42 – Implementação da solução na porta de entrada da sala .....	114
Figura 5.43 - Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 14 de março .....	116



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Caudal mínimo de ar novo devido à ocupação [8] .....	10
Tabela 2.2 – Taxa de metabolismo dos ocupantes consoante o tipo de atividade [8] .....	12
Tabela 2.3- Classes de inércia térmica interior, $I_t$ [4] .....	14
Tabela 2.4 – Critérios para a determinação da zona climática de inverno [17] .....	16
Tabela 2.5- Critério para a determinação da zona climática de verão [17] .....	16
Tabela 2.6- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados para edifícios de comércio e serviços, $U_{ref}$ [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] [15] .....	19
Tabela 2.7- Fator solar dos vãos envidraçados de referência para edifícios de comércio e serviços [15] .....	20
Tabela 2.8- Valores do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ] [15] .....	21
Tabela 2.9- Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados de edifícios de comércio e serviços, $g_{Tmáx}$ [15] .....	21
Tabela 2.10- Fator de orientação para as diferentes exposições, $X_j$ .....	23
Tabela 2.11 – Coeficiente de absorção da radiação solar [4] .....	26
Tabela 3.1 – Níveis de compressibilidade [19] .....	32
Tabela 3.2 – Níveis de estabilidade dimensional [19] .....	32
Tabela 3.3 – Níveis de comportamento à água líquida [19] .....	33
Tabela 3.4 – Níveis de comportamento mecânico em coesão e flexão [19] .....	33
Tabela 3.5 – Níveis de Permeância ao vapor de água [19] .....	34
Tabela 3.6- Isolamentos térmicos comumente utilizados em Portugal (adaptado de [19]) .....	35
Tabela 3.7- Valores de condutibilidade térmica da lã de rocha [20] .....	36
Tabela 3.8- Valores de condutibilidade térmica da lã de vidro [20] .....	37
Tabela 3.9- Condutibilidade térmica do Betão Celular [30] .....	39
Tabela 3.10- Valores de condutibilidade térmica para o EPS [20] .....	41
Tabela 3.11- Valores de condutibilidade térmica da espuma rígida de poliuretano [20] .....	43
Tabela 3.12 – Isolamentos térmicos convencionais .....	58
Tabela 3.13- Isolamentos térmicos com materiais sustentáveis .....	59
Tabela 4.1 – Exigências a satisfazer na envolvente dos edifícios escolares – MEXREB (Adaptado de Lanzinha/Freitas 2003) .....	66
Tabela 4.2 – Exigências construtivas e funcionais da envolvente (adaptado de [115]) .....	77
Tabela 4.3 – Avaliação de materiais e sistemas e âmbito de aplicação (adaptado de [115]) .....	78

Tabela 4.4 - Caraterização construtiva e térmica representativa da envolvente exterior de escolas reabilitadas pela Parque Escolar [116].....	79
Tabela 4.5 – Sistemas de ventilação e climatização instalados [118] .....	80
Tabela 5.1- Dimensões mínimas das amostras (adaptado de [128]) .....	94
Tabela 5.2 - Zonamento climático .....	95
Tabela 5.3 - Energia solar acumulada para a estação de arrefecimento .....	96
Tabela 5.4- Valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência dos elementos opacos e dos vãos envidraçados para os edifícios de comércio e serviço para a zona climática I2 [15] .....	97
Tabela 5.5 – Massa total dos elementos construtivos .....	99
Tabela 5.6- Valores obtidos no cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento na sala de aula.....	100
Tabela 5.7 – Pesagens iniciais para verificação do estado seco do material.....	106
Tabela 5.8 – Massa volúmica das amostras .....	108
Tabela 5.9 – Valores de condutibilidade térmica obtidos.....	108
Tabela 5.10 – Valores de referência para isolantes térmicos [20] .....	109
Tabela 5.11- Valores obtidos no cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento na sala de aula.....	115
Tabela 5.12 - Simulação de resultados com $R_{phref}$ .....	117
Tabela 5.13 - Simulação de resultados aplicando o material de desperdício nas paredes em contacto com espaços não úteis .....	118

## SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

$A_r$	Alongamento à rotura [%]
$z$	Altitude [m]
$z_{ref}$	Altitude de referência [m]
$A_{eve}$	Área da envolvente vertical exterior do edifício ou fração em estudo, por orientação [m <sup>2</sup> ]
$S_i$	Área da superfície interior do elemento $i$ [m <sup>2</sup> ]
$A$	Área do elemento [m <sup>2</sup> ]
$A_{op}$	Área do elemento da envolvente opaca exterior [m <sup>2</sup> ]
$A_{s,v_{nj}}$	Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento $n$ com orientação $j$ [m <sup>2</sup> ]
$A_{s,i_{nj}}$	Área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado na superfície $n$ com orientação $j$ [m <sup>2</sup> ]
$A_{s,i}$	Área efetiva coletora na estação de aquecimento [m <sup>2</sup> ]
$A_w$	Área total do envidraçado, incluindo o vidro e caixilho [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior [m <sup>2</sup> ]
$Q$	Caudal mínimo de ar novo [m <sup>3</sup> /h]
$\alpha$	Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca
$\alpha$	Coeficiente de dilatação térmica linear [°C <sup>-1</sup> ]
$\pi$	Coeficiente de permeabilidade ao vapor de água [kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa) ou g/(m.h.mmHg)]
$b_{tr}$	Coeficiente de redução de perdas de espaços não úteis
$H_{ve}$	Coeficiente de transferência de calor por ventilação [W/°C]
$U$	Coeficiente de transmissão térmica [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$U_{bw}$	Coeficiente de transmissão térmica de paredes em contacto com o solo [W/m <sup>2</sup> .°C]
$U_{bf}$	Coeficiente de transmissão térmica de pavimentos em contacto com o solo [W/m <sup>2</sup> .°C]
$U_{ref}$	Coeficiente de transmissão térmica de referência [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$H_t$	Coeficiente global de transferência de calor [W/°C]
$H_{tr}$	Coeficiente global de transferência de calor por transmissão [W/°C]
$H_{tr,i}$	Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento [W/°C]
$H_{tr,v}$	Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento [W/°C]
$H_{ve,i}$	Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [kWh]
$H_{ve,v}$	Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento [kWh]

$\psi_{\text{ref}}$	Coefficientes de transmissão linear [W/(m.°C)]
$\lambda$	Condutividade térmica dos materiais [W/(m.°C) ou W/m.K]
$a$	Declive
$D$	Deformação por peso próprio (afastamento, em suspensão, de 0,35 m do provete em relação a um plano de referência) [m]
$B'$	Dimensão característica do pavimento [m]
$L_v$	Duração da estação de arrefecimento [h]
$M$	Duração média da estação convencional de aquecimento [mês]
$I_{\text{sol}}$	Energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal e em superfícies verticais para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais [kWh/m²]
$G_{\text{sol},j}$	Energia solar média incidente numa superfície com orientação $j$ durante toda a estação de arrefecimento [kWh/m²]
$e$	Espessura do elemento/isolamento [m]
$F_{s,vn_j}$	Fator de obstrução da superfície do elemento $n$ , com a orientação $j$
$F_{s,ln_j}$	Fator de obstrução do vão envidraçado $n$ com orientação $j$ na estação de aquecimento
$X_j$	Fator de orientação para as diferentes exposições
$r$	Fator de redução da massa superficial útil
$\mu$	Fator de resistência à difusão do vapor de água
$F_o$	Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, compreendendo pelas palas e varandas
$F_f$	Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo pelas palas verticais, outros corpos ou partes de um edifício
$\eta_{V_{\text{ref}}}$	Fator de utilização de ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento
$\eta_i$	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento
$\eta_{i_{\text{ref}}}$	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento de referência unitário
$\eta_v$	Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento
$g_i$	Fator solar de inverno
$g_{v_{\text{ref}}}$	Fator solar de referência para a estação de arrefecimento
$g_L$	Fator solar do envidraçado
$g_v$	Fator solar do envidraçado na estação de arrefecimento
$g_T$	Fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis, totalmente ativados
$g_{T_{\text{máx}}}$	Fator solar global máximo admissível dos vãos envidraçados
$q$	Fluxo de calor [W]
$F_g$	Fração envidraçada do vão envidraçado

$Q_{gu,i,ref}$	Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento de referência [kWh]
$Q_{gu,i}$	Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento resultantes de ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes [kWh]
$q_{int}$	Ganhos internos médios [ $W/m^2$ ]
$Q_{int,i}$	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{int,v}$	Ganhos térmicos associados a fontes internas de calor na estação de arrefecimento [kWh]
$Q_{sol,i}$	Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{sol,v}$	Ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar na estação de arrefecimento [kWh]
$Q_{g,i}$	Ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{g,v}$	Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento [kWh]
$Q_{g,v,ref}$	Ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento
$n$	Índice correspondente a cada um dos elementos opacos e envidraçados com orientação $j$
$j$	Índice que corresponde a cada uma das orientações
$It$	Inércia térmica [ $kg/m^2$ ]
$D$	Largura ou profundidade do isolamento respetivamente, no caso do isolamento perimetral horizontal ou vertical [m]
$m_{pi}$	Massa do elemento desde a caixa-de-ar até à face interior [ $kg/m^2$ ]
$m_i$	Massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior [ $kg/m^2$ ]
$M_{si}$	Massa superficial útil do elemento $i$ [ $kg/m^2$ ]
$m_t$	Massa total [ $kg/m^2$ ]
$\rho$	Massa volúmica aparente seca [ $kg/m^3$ ]
$G$	Módulo de elasticidade transversal, obtido conforma NF T 56-118 [Pa]
$N_{ic}$	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício [ $kWh/m^2.ano$ ]
$N_{vc}$	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento do edifício [ $kWh/m^2.ano$ ]
$GD$	Número de graus-dia de aquecimento especificados para cada região NUTS III [ $^{\circ}C.dia$ ]
$X$	Parâmetro climático [meses ou $^{\circ}C$ ]
$X_{ref}$	Parâmetro climático de referência [meses ou $^{\circ}C$ ]
$P_d$	Pé direito médio da fração [m]
$C$	Perda de espessura após aplicação progressiva, por patamares (24h), de uma pressão de 0,01 MPa até 0,04 MPa [mm].
$P_e$	Permeância ao vapor de água [ $kg/(m^2.s.Pa)$ ou $g/(m.h.mmHg)$ ]
$P$	Peso de 10 metros para os produtos em rolo ou 3 painéis, com a mesma espessura e largura que os provetes de ensaio [N]

$Z_m$	Profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo [m]
$I_{sol,ref}$	Radiação solar média de referência, correspondente à radiação incidente numa superfície orientada a oeste [kWh/(m <sup>2</sup> .ano)]
$(A_w/A_p)$	Razão entre a área de vãos e a área interior útil de pavimento
$R_{phref}$	Renovação de ar de referência [h <sup>-1</sup> ]
$R_L$	Resistência em tração longitudinal [N]
$R_t$	Resistência por tração perpendicular às faces [MPa]
$R$	Resistência Térmica [(m <sup>2</sup> .°C)/W]
$R_w$	Resistência térmica da parede, com exclusão de resistências térmicas superficiais [m <sup>2</sup> .°C/W]
$R_f$	Resistência térmica de todas as camadas do pavimento, com exclusão de resistências térmicas superficiais [m <sup>2</sup> .°C/W]
$R_{se}$	Resistência térmica superficial exterior [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$S_f$	Retração ou dilatação a 20 °C, após aquecimento a 70 °C durante 7 dias [m/m]
$S_n$	Retração ou dilatação natural relativa, a partir da saída da fábrica [m/m]
$A_{env}$	Soma das áreas dos vãos envidraçados do edifício ou fração em estudo, por orientação [m <sup>2</sup> ]
$M_{et}$	Taxa de metabolismo dos ocupantes [met.]
$R_{ph}$	Taxa de renovação do ar [h <sup>-1</sup> ]
$R_{ph,i}$	Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento [h <sup>-1</sup> ]
$R_{ph,v}$	Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de arrefecimento [h <sup>-1</sup> ]
$T_2$	Temperatura da superfície do elemento mais frio [°C]
$T_1$	Temperatura da superfície do elemento mais quente [°C]
$\Theta_{ext,v}$	Temperatura exterior média na estação de arrefecimento no local
$\Theta_{ref,v}$	Temperatura interior de referência na estação de arrefecimento, contabilizada em 25°C
$Q_{tr,i,ref}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{tr,v}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente na estação de arrefecimento [kWh]
$Q_{tr,i}$	Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente [kWh]
$Q_{ve,v}$	Transferência de calor por ventilação correspondente à renovação de ar interior durante a estação de arrefecimento [kWh]
$Q_{ve,i,ref}$	Transferência de calor por ventilação de referência na estação de aquecimento [kWh]
$Q_{ve,i}$	Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento [kWh]

$N_i$	Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$N_v$	Valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$G_{sul}$	Valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul, na estação de aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .mês]
$\Delta_{e/e}$	Variação relativa de espessura sob pressão de 100 Pa, em relação a uma pressão inicial de 50 Pa
$V_{HR}$	Variações dimensionais relativas em função da humidade relativa entre dois ambientes a 20 °C/ 15%HR e 20°C/ 90%HR [m/m]

ACERMI	<i>Association pour la Certification des Matériaux Isolants</i>
AQS	Águas Quentes Sanitárias
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CFC	Clorofluorocarboneto
CIB	<i>International Council of Research and Innovation in Building and Construction</i>
EB	Educação Básica
EL1	Elementos da envolvente exterior ou da envolvente interior, ou elementos de construção em contacto com outra fração autónoma ou com edifício adjacente.
EL3	Elementos de compartimentação interior da fração autónoma (parede ou pavimento)
EL2	Elementos em contacto com o solo
EPS	Poliestireno Expandido Moldado
ETICS	Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior
GEE	Gases com Efeito de Estufa
GES	Grandes Edifícios de Comércio e Serviços
GTC	Gestão Técnica Centralizada
HR	Humidade Relativa
IPCC	Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MEXREB	Metodologia Exigencial de Reabilitação
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
NIT	Nota de Informação Técnica
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
ONU	Organização das Nações Unidas

PES	Pequenos Edifícios de Comércio e Serviços
PET	Tereftalato de Polietileno
PQ	Perito Qualificado
PTL	Pontes Térmicas Lineares
PTP	Ponte Térmica Plana
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Cloreto de polivinilo)
QAI	Qualidade do ar interior
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmicos dos Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RPE	Revestimento Plástico Espesso
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
SE	Sensor exterior
SI	Sensor interior
UE	União Europeia
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
VIP	Painel de Isolamento a Vácuo
WFS	<i>Woven fabric subwaste</i>
WFW	<i>Woven fabric waste</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
XPS	Poliestireno Expandido Extrudido
Máx.	Máximo
Ref.	Referência
Temp.	Temperatura







# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

O conceito de sustentabilidade tem vindo a ganhar especial destaque nos dias de hoje, uma vez que existe uma maior preocupação com a preservação do meio ambiente e, consequentemente, com a qualidade de vida do ser humano. Tem repercussões em todas as atividades desenvolvidas pelo Homem, com especial relevância sobre a construção. Assim, urge introduzir o conceito de construção sustentável cuja estratégia ambiental implica a produção de construções adaptadas ao meio ambiente, pensando nas exigências dos seus utilizadores e nas gerações futuras.

Deste modo, surge o princípio da utilização de materiais sustentáveis, que podem ser materiais naturais, reciclados ou de desperdício e cuja reciclagem ou reutilização potencia uma economia circular, onde os resíduos são eliminados e os recursos são utilizados de maneira eficiente, podendo os desperdícios de uma indústria, por exemplo, tornar-se a matéria-prima de outra.

Neste âmbito, importa conceber materiais utilizando desperdícios. Estes desperdícios poderão permitir que, por exemplo, os edifícios minimizem a energia utilizada, uma vez que atualmente, a redução da energia consumida se revela um dos maiores desafios do futuro. Em edifícios escolares, atendendo à sua utilização predominantemente diurna, o consumo de energia pode ser minimizado através de uma envolvente adaptada ao clima e da adequada utilização pelos seus ocupantes.

A integração de uma construção sustentável em edifícios escolares faz todo o sentido, não só pelo caráter pedagógico inerente, como pela oportunidade de alertar as gerações futuras para as preocupações ambientais do planeta e advertir para a importância da preservação do meio ambiente nos diversos setores, em particular o da construção que é o que mais contribui para o consumo de energia e recursos naturais.

Dentro das estratégias para o futuro, e atendendo a estes requisitos de âmbito ecológico, os antigos e desativados edifícios escolares do Plano dos Centenários poderão ser reabilitados e adaptados a diversos usos para continuarem a responder às necessidades da população. Assim é importante refletir sobre o impacto que o ambiente de aprendizagem tem na qualidade de ensino e compreender que o desempenho térmico de um edifício é um fator de enorme relevo no conforto dos seus ocupantes.

Face à problemática atual, é imperativo desenvolver medidas que potenciem melhorias do desempenho térmico dos edifícios escolares desativados, através da utilização de materiais sustentáveis e que potenciem uma reabilitação térmica ecologicamente viável, adaptando-os às exigências atuais e aproveitando o parque escolar edificado.

## 1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

Esta dissertação surgiu da perceção dos problemas atuais e do objetivo de encontrar novas soluções que permitissem melhorar o desempenho térmico dos edifícios, recorrendo a materiais de desperdício industriais que são produzidos diariamente pelas diversas indústrias e que não são aproveitados. A sua integração numa sala de aula do Plano dos Centenários permite um estudo alargado pois, hoje em dia, muitas escolas primárias encontram-se desativadas, face ao não cumprimento das exigências de conforto atuais. Sendo o Plano dos Centenários um projeto onde todas as salas foram construídas a partir de uma sala célula, os resultados obtidos neste trabalho poderão ser reproduzidos nas restantes salas e/ou em edifícios escolares do mesmo Plano.

Assim, consideraram-se os seguintes objetivos:

- Avaliação do desempenho térmico inicial da sala de aula;
- Análise de materiais de desperdício existentes e que potenciem ações de melhoria;
- Estudo do material de desperdício selecionado e elaboração de uma proposta de implementação;
- Elaboração das medidas de melhoria do desempenho térmico propostas;
- Avaliação do desempenho térmico da sala de aula e verificação das melhorias existentes.

## 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em seis capítulos, sendo o primeiro destinado à introdução do tema, onde se apresenta o enquadramento, âmbito e objetivos e a estrutura da dissertação.

Posto isto, o capítulo 2 apresenta um estado de arte sobre Térmica de Edifícios, onde primeiramente se expõem noções teóricas básicas ligadas aos fenómenos decorrentes em edifícios e, posteriormente, apresenta-se a regulamentação vigente no âmbito da térmica de edifícios, com especial relevância para o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

O capítulo 3, relativo a Isolamentos Térmicos, inicia-se com uma apresentação exigencial de isolantes térmicos, sendo ainda expostos os isolamentos térmicos convencionais comumente utilizados em Portugal e isolamentos térmicos inovadores, quer em relação a inovações associadas a materiais convencionais, quer através de novos materiais. O capítulo termina com a apresentação dos isolamentos térmicos com materiais sustentáveis, expondo-se a importância da sua utilização e apresentando-se estudos de desempenho térmico realizados com materiais de desperdício.

No capítulo 4 dá-se especial destaque aos Edifícios Escolares onde, em primeiro lugar, são apresentadas as escolas primárias dos Planos dos Centenários e, em seguida, são expostas medidas que podem ser realizadas na reabilitação térmica de edifícios escolares. São ainda mostradas melhorias do desempenho térmico em salas de aula realizadas em Portugal.

O capítulo 5 apresenta o Caso de Estudo realizado nesta dissertação, onde é descrito todo o trabalho prático efetuado. Inicia-se com a apresentação da escola e sala em estudo e, posteriormente, descreve-se toda a metodologia e os equipamentos utilizados, assim como a avaliação do desempenho térmico inicial da sala de aula. Finalmente, apresenta-se a proposta de melhoria do desempenho térmico da sala, culminando com a sua avaliação depois da implementação proposta.

No último capítulo (capítulo 6) apresentam-se as conclusões e propõem-se desenvolvimentos futuros.

# 2

## TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

### 2.1. NOÇÕES TEÓRICAS BÁSICAS

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

As condições de conforto higrotérmico dos utentes de um edifício podem ser asseguradas por diversos processos, os quais podem exigir diferentes recursos económicos. Deste modo, diferentes tipologias de envolvente podem apresentar condições de conforto semelhantes, a que corresponderão custos iniciais de construção e custos de exploração diferentes. Estes últimos são particularmente importantes, uma vez que irão traduzir-se na poupança de energia ao longo do tempo de exploração, justificando-se o esforço pela procura de soluções construtivas que permitam assegurar condições liminares de conforto, minimizando a utilização de equipamentos [1].

Na caracterização térmica de um edifício é importante, *a priori*, proceder à análise da envolvente do edifício que pode ser considerada como envolvente interior e envolvente exterior. A envolvente interior faz a separação do espaço interior do edifício com os espaços não úteis (espaços não aquecidos), como por exemplo, lavandarias, caixa de escadas, garagens, desvão de coberturas, entre outros. Relativamente à envolvente exterior, esta separa o espaço interior do espaço exterior do edifício e será a envolvente mais relevante para o comportamento térmico deste, uma vez que será onde vai haver mais perdas térmicas. Quando o edifício se encontra em contacto com outro edifício, esta envolvente não apresenta requisitos para o cálculo térmico.

Em regra, com esta caracterização é possível calcular o balanço de ganhos e perdas de energia, ou seja, a relação entre os ganhos e as perdas totais de calor através da envolvente, sendo importante [1]:

- i) em condições de inverno:
  - garantir que os ganhos térmicos sejam superiores às perdas térmicas;
  - determinar o fluxo de calor a fornecer e a potência do equipamento necessária para que a temperatura interior se mantenha praticamente constante para um valor de referência.
- ii) em condições de verão:
  - determinar o fluxo de calor necessário a retirar ao espaço para que a temperatura no interior não exceda um determinado valor;
  - determinar a temperatura interior na ausência de meios de climatização.

### 2.1.2. MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

A transmissão de calor pode ocorrer segundo três mecanismos: condução, convecção e radiação, como se pode observar na Figura 2.1.

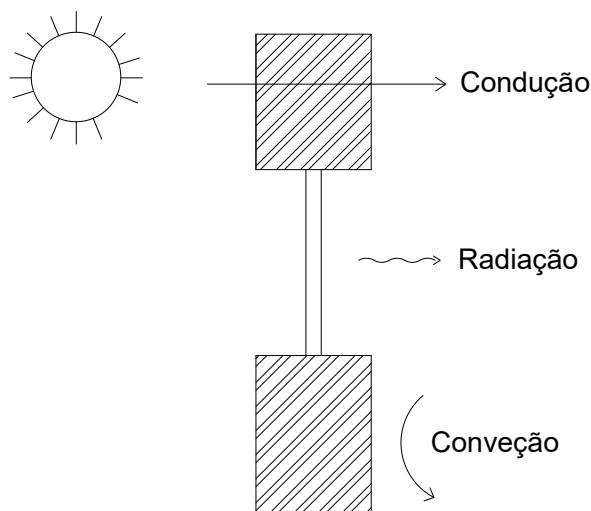


Figura 2.1- Mecanismos de transmissão de calor (adaptado de [2])

Na transmissão de calor por condução, as trocas de calor são efetuadas através de energia cinética a nível molecular em gases, líquidos ou sólidos. Nos líquidos e sólidos não condutores elétricos, a condução térmica ocorre devido às oscilações longitudinais da estrutura. Nos metais, a condução é idêntica à condução elétrica, devido ao movimento dos elétrons livres e nos gases é devido à colisão elástica das moléculas [2].

O fluxo de calor ocorre sempre na direção da redução da temperatura, como deduzido na segunda lei da Termodinâmica, sendo que no caso dos edifícios, ocorre sobretudo na parte sólida. A condução é o processo de transferência de calor mais significativo e depende da condutividade térmica dos materiais,  $\lambda$  [W/(m.°C)] e da espessura dos elementos da envolvente,  $e$  [m], como se pode verificar na Lei de Fourier para a condução (equação 2.1) [3].

$$q = \frac{\lambda}{e} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W}] \quad (2.1)$$

onde:

- $q$  fluxo de calor, [W]
- $\lambda$  condutividade térmica do elemento, [W/m.°C]
- $e$  espessura do elemento, [m]
- $A$  área do elemento, [m<sup>2</sup>]
- $T_1$  temperatura da superfície do elemento mais quente, [°C]
- $T_2$  temperatura da superfície do elemento mais frio, [°C]

No mecanismo de transmissão de calor por convecção, a transferência de energia acontece por movimento dos fluidos, líquidos ou gasosos e condução molecular. Deste modo, este mecanismo ocorre na transmissão de calor de um sólido para o ar adjacente, ou entre duas superfícies com diferentes temperaturas. Com o aumento da velocidade do fluxo do fluido, a transmissão de calor por convecção aumenta, podendo ser de forma natural – gerada internamente devido à não-homogeneidade da densidade por diferenças de temperatura, ou forçada – quando o fluxo é produzido por fontes externas [2].

Na radiação, as trocas de calor são efetuadas por transferência de energia por ondas eletromagnéticas. Para ocorrer este tipo de transmissão de calor, são necessárias apenas duas superfícies a diferentes temperaturas, em que, face à vibração das moléculas superficiais, é emitida energia radiante através do espaço até atingir uma superfície opaca, que absorve parte da energia e reflete a restante [2].

### 2.1.3. TROCAS DE CALOR EM EDIFÍCIOS

#### 2.1.3.1. Introdução

As trocas de calor em edifícios podem classificar-se em perdas ou ganhos de calor. Relativamente às perdas, estas ocorrem através da envolvente e dividem-se em perdas por transmissão através dos elementos da envolvente e perdas por ventilação devido à taxa nominal horária de renovação de ar interior [3]. Estas trocas de calor podem ser quantificadas através do coeficiente global de transferência de calor,  $H_t$ , calculado através da equação 2.2 e publicado no Despacho n.º15793-K/2013[4].

$$H_t = H_{tr} + H_{ve} \text{ [W/°C]} \quad (2.2)$$

Onde  $H_{tr}$  e  $H_{ve}$  são, respetivamente, o coeficiente global de transferência de calor por transmissão e o coeficiente de transferência de calor por ventilação.

Relativamente aos ganhos de calor, estes ocorrem através da envolvente, sendo ainda contabilizado uma parcela de ganhos internos decorrentes da libertação de calor pelo metabolismo humano e por efeito de Joule<sup>1</sup> (com exceção do caso em que é utilizado para efeitos de climatização) associado ao funcionamento dos equipamentos dos edifícios [3].

O balanço energético entre as perdas e ganhos de calor é dividido em dois períodos, inverno e verão, uma vez que a direção do fluxo de calor se altera nessas épocas, o que leva à necessidade de cálculo do parâmetro  $H_{tr,i}$  para a estação de aquecimento (inverno) e  $H_{tr,v}$  para a estação de arrefecimento (verão). Estes parâmetros permitem determinar as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício  $N_{ic}$  (equação 2.3) e as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento  $N_{vc}$  (equação 2.4) presentes no Despacho n.º15793-I/2013[5].

$$N_{ic} = \frac{(Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i})}{A_p} \text{ [kWh/m}^2\text{.ano]} \quad (2.3)$$

<sup>1</sup> O efeito de Joule corresponde à transformação de energia elétrica em energia calorífica. Os eletrões, animados de uma dada velocidade, e, portanto, de energia cinética, chocam com os átomos, comunicando a estes parte da sua energia sob a forma calorífica [1]

com:

- $Q_{tr,i}$  Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente, [kWh]  
 $Q_{ve,i}$  Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, [kWh]  
 $Q_{gu,i}$  Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento resultantes de ganhos solares através dos vãos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes, [kWh]  
 $A_p$  Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m²].

$$N_{vc} = \frac{(1-\eta_v)Q_{g,v}}{A_p} \quad [\text{kWh/m}^2.\text{ano}] \quad (2.4)$$

onde:

- $\eta_v$  Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento  
 $Q_{g,v}$  Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, [kWh]  
 $A_p$  Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior [m²]

Na Figura 2.2 e 2.3 apresenta-se esquematicamente o balanço térmico em edifícios.

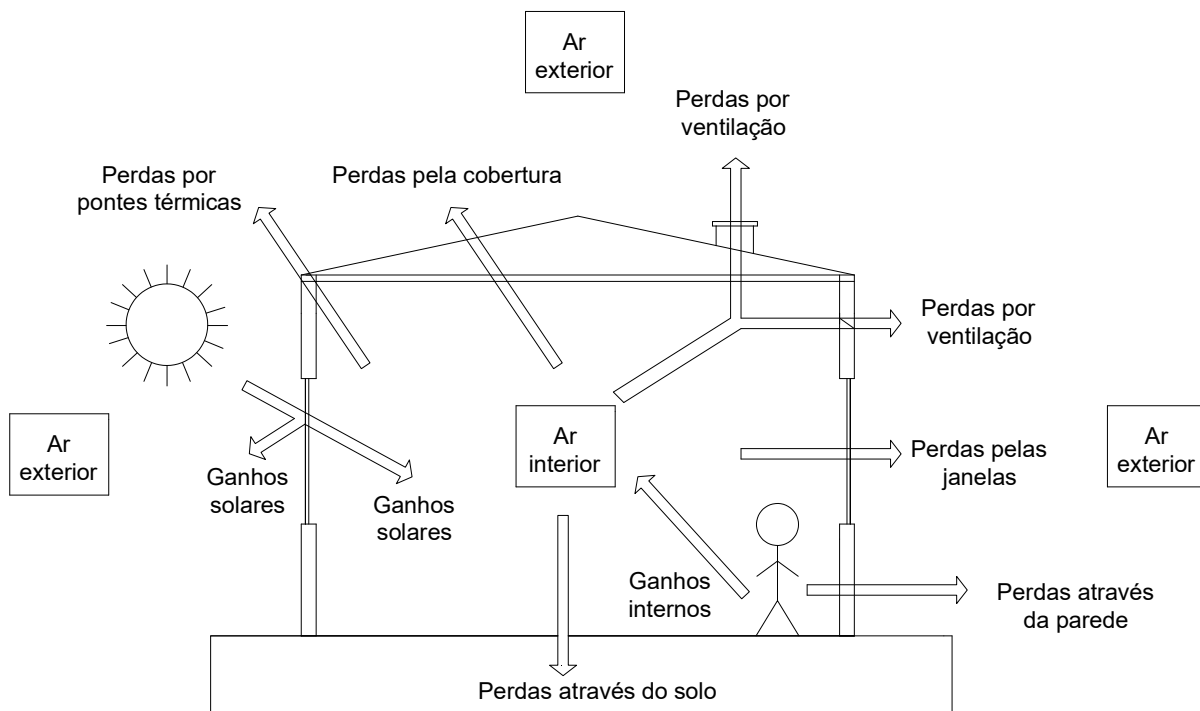


Figura 2.2- Balanço térmico em edifícios a estação de aquecimento



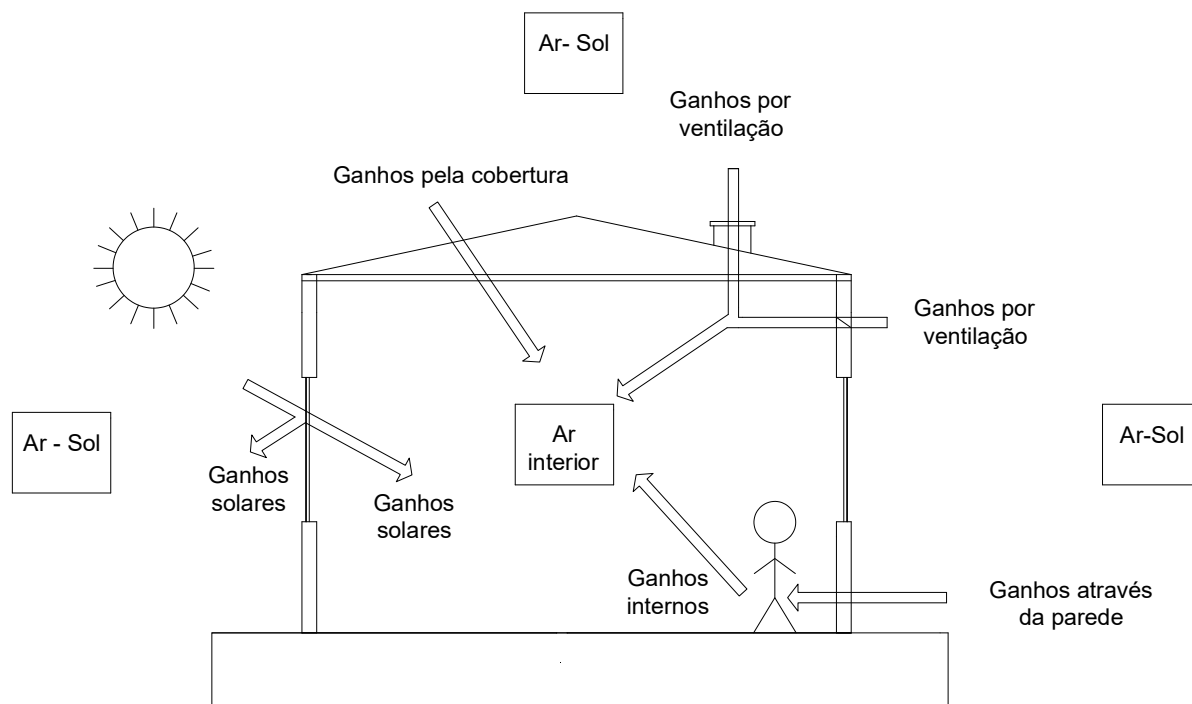


Figura 2.3- Balanço térmico em edifícios na estação de arrefecimento

#### 2.1.3.2. Trocas de calor por condução através da envolvente

As trocas de calor por condução podem acontecer, maioritariamente, através de três elementos: zonas correntes, pontes térmicas e do contacto direto com o solo.

Relativamente às trocas de calor através da zona corrente<sup>2</sup> da envolvente dos edifícios, estas dependem das propriedades térmicas dos materiais ou meios constituintes e traduzem-se por parâmetros de desempenho característico dos elementos de construção, como por exemplo, o coeficiente de transmissão térmica,  $U$  [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ] [1].

Importa referir que durante a estação de aquecimento, inverno, o efeito da radiação solar sobre a envolvente exterior é favorável para o cálculo das necessidades de aquecimento, uma vez que, por norma, o ambiente exterior se encontra a uma temperatura inferior ao ambiente interior (Figura 2.4). Por outro lado, na estação de arrefecimento, verão, essa radiação é prejudicial, uma vez que o fluxo de calor inverte o seu sentido [1].

<sup>2</sup> Designam-se zona corrente, as zonas dos elementos de construção que apresentem um padrão uniforme em termos de forma (geometria) e constituição interna [1].

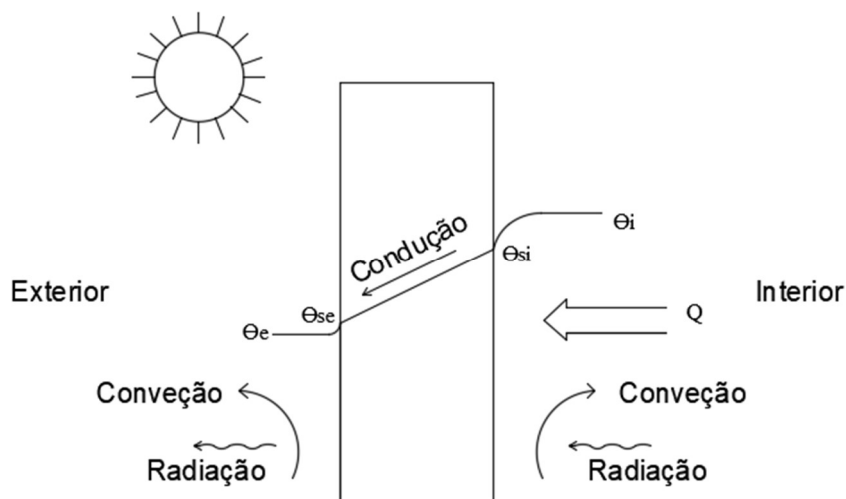


Figura 2.4- Transmissão de calor através de um elemento de construção na estação de aquecimento

Quanto ao fenómeno das zonas de pontes térmicas<sup>3</sup>, as linhas de fluxo de calor perdem o paralelismo, que dá o carácter unidimensional ao processo de transmissão, e tomam as direções em que a resistência oferecida à passagem do calor é menor, transformando o processo de transmissão de calor nessas zonas, num processo bidimensional ou tridimensional [1].

Os fatores que estão na origem das pontes térmicas são [1]:

- Transição entre materiais de diferentes condutibilidades térmicas;
- Alterações de espessura do elemento;
- Encontro entre paredes (cunhais), entre paredes e tetos, entre paredes e pavimentos, etc.

Na Figura 2.5 apresenta-se o desenvolvimento das linhas de fluxo de calor em casos correntes de pontes térmicas.

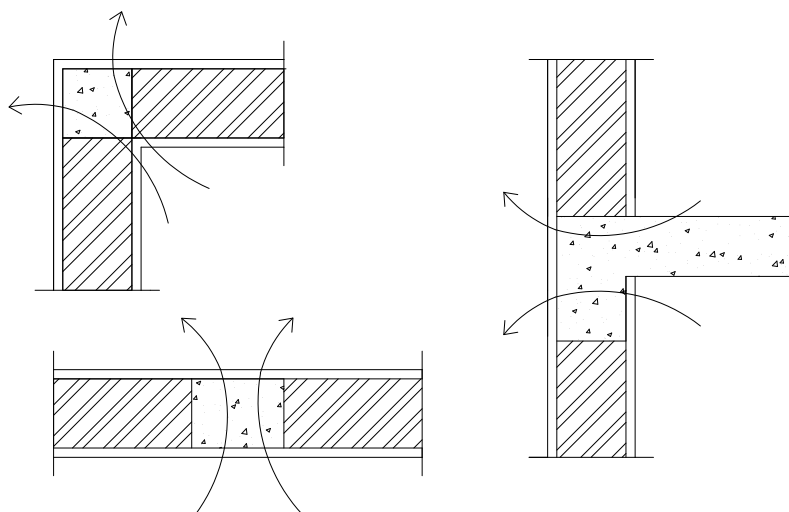


Figura 2.5- Linhas de fluxo de calor em casos típicos de pontes térmicas

<sup>3</sup> Designam-se pontes térmicas, toda a parte da envolvente onde não é possível admitir a hipótese de uniformidade de resistência térmica,  $R$  [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ], como convencionalmente se aborda nas zonas correntes dos elementos de construção [1].

As pontes térmicas podem ser planas ou lineares, sendo que uma ponte térmica plana (PTP) é uma heterogeneidade inserida em zona corrente da envolvente, como por exemplo, pilares, vigas e caixas de estore. As pontes térmicas lineares (PTL) são zonas de ligação entre diferentes elementos da envolvente de um edifício que, geralmente, se caracterizam por um aumento no fluxo de calor e, consequentemente, uma diminuição das temperaturas superficiais interiores responsáveis pela potencial ocorrência de condensações. O fluxo de calor que atravessa uma PTL, em regime estacionário, pode ser determinado através do respetivo coeficiente de transmissão térmica linear,  $\psi$  [W/(m.°C)], calculado de acordo com o método preconizado na norma ISO 10211[6].

Quando um elemento de construção se encontra em contacto direto com o solo, como é o caso de paredes enterradas e pavimentos, cujas temperaturas apresentam características de variações específicas que diferem do ar ambiente, interior e exterior, processam-se trocas de calor por condução [1].

Nestes casos, a avaliação das trocas de calor, depende do conhecimento da distribuição de temperatura no solo e do conhecimento da condutibilidade térmica deste, que é bastante variável. Estes fatores, associados à elevada massa térmica do solo, comprometem o cálculo deste tipo de trocas, tornando-o menos rigoroso quando comparado com outras partes do edifício [1].

Através das Tabelas 03 a 06 do Despacho n.º15793-K/2013 [4], é possível efetuar este cálculo, tendo presente o conhecimento dos seguintes elementos:

- Dimensão característica do pavimento,  $B'$  [m];
- Resistência térmica de todas as camadas do pavimento,  $R_f$  [(m².°C)/W], com exclusão de resistências térmicas superficiais;
- Resistência térmica da parede,  $R_w$  [(m².°C)/W], com exclusão de resistências térmicas superficiais
- Largura ou profundidade do isolamento  $D$  [m], no caso do isolamento perimetral horizontal ou vertical, respetivamente;
- Profundidade média enterrada da parede em contacto com o solo  $z_m$  [m].

Os elementos acima apresentados permitem calcular o coeficiente de transmissão térmica de pavimentos em contacto com o solo,  $U_{bf}$ , e o coeficiente de transmissão térmica de paredes em contacto com o solo,  $U_{bw}$ , ambos em W/m².°C.

#### 2.1.3.3. Trocas de calor por renovação do ar

Para que haja condições de higiene e salubridade do ar interior, é indispensável que os edifícios sejam ventilados, por via natural, mecânica ou mista. No entanto, estes caudais de ventilação deverão ser reduzidos ao mínimo necessário para satisfazer as exigências, uma vez que constituem uma fonte de troca de calor entre o interior e o exterior e levam a consequentes acréscimos de consumo de energia necessários para manter as condições interiores nos níveis de conforto desejados [1].

A legislação em vigor prevê a contabilização destas trocas no cálculo das necessidades nominais de energia útil, em função do parâmetro de taxa de renovação do ar,  $R_{ph}$ , do local. O valor do  $R_{ph}$  varia em função da atividade, sendo que para edifícios de habitação, o valor de referência deverá ser igual ou superior a 0,40 renovações por hora no inverno e 0,60 renovações por hora no verão [7]. Em edifícios de comércio e serviço, o cálculo da taxa de renovação do ar é efetuado pela equação 2.5, onde através do conhecimento da atividade praticada e do volume do espaço é possível proceder ao cálculo.

$$R_{ph} = \frac{Q}{A_p \cdot P_d} \quad (h^{-1}) \quad (2.5)$$

com:

Q Caudal mínimo de ar novo, [m<sup>3</sup>/h]

A<sub>p</sub> Área de pavimento do edifício, medido pelo interior, [m<sup>2</sup>]

P<sub>d</sub> Pé direito médio da fração, [m]

O caudal mínimo de ar novo devido à ocupação, encontra-se estabelecido na Portaria n.º353-A/2013 [8] (Tabela 2.1).

Tabela 2.1- Caudal mínimo de ar novo devido à ocupação [8]

Tipo de atividade	Caudal de ar novo [m <sup>3</sup> /(hora.pessoa)]	Exemplos de tipo de espaço
<b>Sono</b>	16	Quartos, Dormitórios e similares
<b>Descanso</b>	20	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas
<b>Sedentária</b>	24	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares
	28	Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche
<b>Moderada</b>	35	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares
<b>Ligeiramente Alta</b>	49	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares
<b>Alta</b>	98	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares

As trocas de calor por ventilação, que se dão por via natural, por ação térmica ou por ação do vento, são incertas, devido à sua aleatoriedade, e frequentemente agravadas pelo modo como os utentes utilizam os vãos envidraçados e opacos, mantendo-os muitas vezes abertos por um período de tempo excessivo, contribuindo consideravelmente para desperdícios de energia. Por outro lado, a inexistência de hábitos de arejamento, contribui para a ocorrência de condensações e de deterioração da qualidade do ar interior. Neste sentido, e de modo a precaver estes hábitos, a Norma NP 1037-1 [9] estabelece disposições especiais que asseguram a ventilação mínima das habitações, mesmo sem a intervenção dos habitantes [1].

#### 2.1.3.4. Ganhos solares através dos envidraçados

Como anteriormente foi mencionado, a radiação faz parte de um dos mecanismos de transmissão de calor. Num edifício, os envidraçados assumem particular relevância devido às perdas e ganhos de calor que ocorrem através da sua superfície. Deste modo, é importante proceder a uma escolha ponderada do tipo de vidro, assim como garantir que a área de envidraçado não conduza à necessidade de utilização de recursos de aquecimento ou arrefecimento, muito dispendiosos para assegurar conforto térmico [3].

Face ao clima que Portugal nos proporciona, a captação de radiação solar na estação de aquecimento, inverno, tem todo o interesse e é facilmente exequível através da colocação de vãos envidraçados nas fachadas orientadas a sul. Já na estação de arrefecimento, verão, e uma vez que se pretende minimizar os ganhos solares, deverá recorrer-se a soluções de sombreamento, de modo a minimizar a área de incidência solar [3].

Da radiação total incidente no envidraçado, uma parte é refletida imediatamente para o exterior, outra é refletida para o interior do local e uma terceira parte é absorvida pelo vidro (Figura 2.6). A quantidade de energia solar transmitida para o interior decompõe-se numa parcela instantânea, que passa diretamente através do envidraçado, e de uma parcela diferida que constitui a parte de energia acumulada no elemento que, posteriormente, é transferida para o interior por convecção e radiação [1].

De modo a contabilizar o total de energia transferida para o interior através da radiação solar, não basta ter conhecimento das características de transmissão instantânea do envidraçado, mas recorrer ao fator solar do envidraçado,  $g_L$ , que se define como a relação entre o ganho de calor através do vidro, instantaneamente ou absorvido posteriormente, e a radiação solar nele incidente. Deste modo, quanto menor foi o fator solar, menores serão os ganhos solares pelo vidro [1].

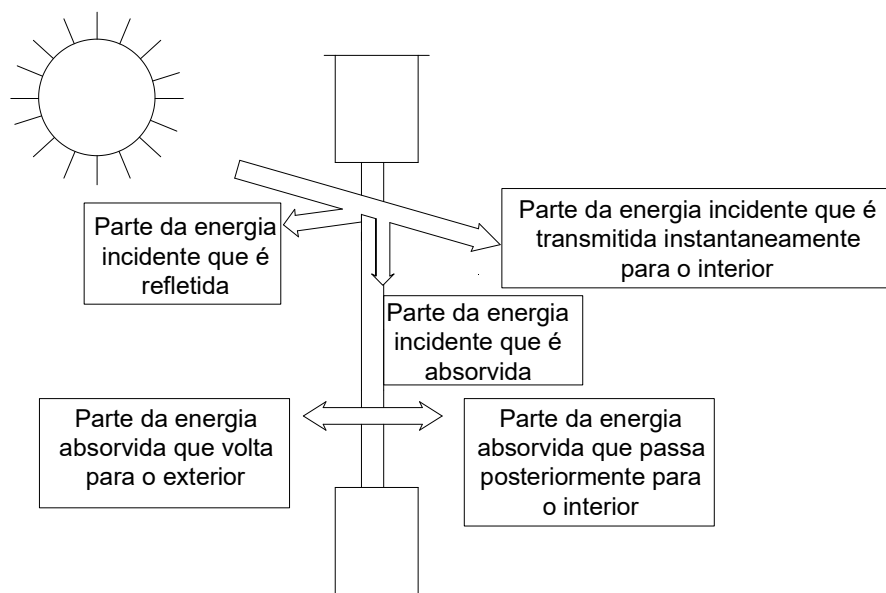


Figura 2.6- Elemento envidraçado sob a ação da radiação solar (adaptado de [1])

## 2.1.4. GANHOS INTERNOS

Num edifício, todos os processos dos quais resulte conversão de energia química ou elétrica em calor, constituem ganhos internos desses edifícios. Como principais fontes de ganhos internos de calor, consideram-se as pessoas que ocupam o edifício, que libertam calor em resultado da sua atividade metabólica, os sistemas de iluminação elétrica e os restantes equipamentos elétricos instalados e que dissipam calor em resultado do seu funcionamento e ainda os aparelhos não elétricos que produzem calor, como fogões, caldeiras ou esquentadores a gás [1].

Relativamente às pessoas, o calor resultante dos processos metabólicos do organismo, que resulta do tipo de atividade, representa normalmente uma fração importante dos ganhos de calor de um edifício, podendo ser uma parcela dominante da carga de arrefecimento em edifícios de grande ocupação [1].

Na Tabela 2.2 é possível observar a taxa de metabolismo dos ocupantes de um edifício, consoante o tipo de atividade praticada.

Tabela 2.2 – Taxa de metabolismo dos ocupantes consoante o tipo de atividade [8]

<b>Tipo de atividade</b>	<b>Taxa de metabolismo dos ocupantes – <math>M_{et}</math> (met)</b>	<b>Exemplos de tipo de espaço</b>
<b>Sono</b>	0,80	Quartos, Dormitórios e similares
<b>Descanso</b>	1,00	Salas de repouso, Salas de espera, Salas de conferências, Auditórios e similares, Bibliotecas
<b>Sedentária</b>	1,20	Escritórios, Gabinetes, Secretarias, Salas de aula, Cinemas, Salas de espetáculo, Salas de refeições, Lojas e similares, Museus e galerias, Salas de convívio, Salas de atividade de estabelecimentos de geriatria e similares  Salas de jardim de infância e pré-escolar e Salas de creche
<b>Moderada</b>	1,75 (1,40 a 2,00)	Laboratórios, Ateliers, Salas de Desenho e Trabalhos Oficiais, Cafés, Bares, Salas de Jogos e similares
<b>Ligeiramente Alta</b>	2,50 (2,00 a 3,00)	Pistas de dança, Salas em ginásios, Salas de ballet e similares
<b>Alta</b>	5,00 (3,00 a 9,00)	Salas de musculação, Salas em ginásios e pavilhões desportivos e similares

### 2.1.5. INÉRCIA TÉRMICA

A inércia térmica de um edifício é garantida pela capacidade de um elemento de construção armazenar calor, libertando-o ao longo do tempo, sendo que permite absorver os ganhos de calor durante o dia (reduzindo a carga de arrefecimento) e libertá-los à noite (reduzindo a carga de aquecimento) contribuindo para uma maior estabilidade das temperaturas interiores, relativamente às oscilações térmicas do exterior e permitindo uma utilização racional de energia na climatização dos espaços [1].

De modo a quantificar a inércia térmica, é necessário conhecer a massa dos elementos de construção, a condutibilidade térmica dos materiais e do seu calor específico. Para que se possa tirar partido do mecanismo da inércia térmica de um edifício é importante que a massa de armazenamento térmico não esteja impedida de absorver calor, devido à aplicação de revestimentos termicamente resistentes ou de isolamento térmico no seu paramento interior [10].

O seu cálculo pode ser efetuado segundo a equação 2.6 presente no Despacho n.º15793-K/2013[4].

$$I_t = \frac{\sum_i M_{Si} \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (2.6)$$

com:

$M_{Si}$	Massa superficial útil do elemento i, [kg/m <sup>2</sup> ]
$r$	Fator de redução da massa superficial útil
$S_i$	Área da superfície interior do elemento i, [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Área interior útil de pavimento, [m <sup>2</sup> ]

A massa superficial útil de cada elemento de construção,  $M_{Si}$  é determinada em função da sua localização no edifício e da sua constituição, nomeadamente através do posicionamento do isolamento térmico e das características das soluções de revestimento superficial [4].

Assim, distinguem-se três tipos de elementos, sendo o valor de  $M_{Si}$  calculado da seguinte forma [4]:

- i) No caso de elementos da envolvente exterior ou da envolvente interior, ou elementos de construção em contacto com outra fração autónoma ou com edifício adjacente (EL1), o valor de  $M_{Si}$ , nunca poderá ser superior a 150 kg/m<sup>2</sup>, sendo que:
  - No caso de paredes sem isolamento térmico e de coberturas ou esteiras pesadas de desvão de coberturas inclinadas, se não existir caixa-de-ar,  $M_{Si} = \frac{m_t}{2}$ , onde  $m_t$  corresponderá à massa total do elemento. Se existir caixa-de-ar,  $M_{Si} = m_{pi}$  onde  $m_{pi}$  corresponderá à massa total do elemento desde a caixa-de-ar até à face interior;
  - Para todos os elementos com uma camada de isolamento térmico,  $M_{Si} = m_i$ , em que  $m_i$  é a massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior com exceção das situações em que exista uma caixa-de-ar entre o isolamento térmico e a face interior. Para este caso,  $m_i$  corresponderá à massa do elemento desde a caixa-de-ar até à face interior.

- ii) No caso de elementos em contacto com o solo (EL2), o valor de  $Ms_i$  nunca poderá ser superior a  $150 \text{ kg/m}^2$ , sendo que:
- No caso de elementos sem isolamento térmico,  $Ms_i$ , corresponderá a  $150 \text{ kg/m}^2$ ;
  - No caso de elementos com uma camada de isolamento térmico,  $Ms_i = m_i$ , onde  $m_i$  corresponderá à massa do elemento desde o isolamento térmico até à face interior.
- iii) No caso de elementos de compartimentação interior da fração autónoma, compreendendo parede ou pavimento (EL3), o valor de  $Ms_i$ , nunca poderá ser superior a  $300 \text{ kg/m}^2$ , sendo que:
- Nos casos de elementos sem isolamento térmico,  $Ms_i = m_t$ , onde  $m_t$  corresponderá à massa total do elemento;
  - No caso de elementos com uma camada de isolamento térmico, o valor de  $Ms_i$  tem de ser avaliado de forma isolada em cada um dos lados da camada de isolamento térmico, sendo que em cada um dos lados,  $Ms_i = m_i$ , onde  $m_i$  corresponderá à massa do elemento desde o isolamento térmico até à face em análise; Para os devidos efeitos, os parciais de  $Ms_i$  nunca podem ser superiores a  $150 \text{ kg/m}^2$ .

Depois de concluída a sua quantificação, é possível determinar a classe de inércia térmica do edifício, ou fração, de acordo o Despacho n.º15793-K/2013 (Tabela 2.3) [4].

Tabela 2.3- Classes de inércia térmica interior,  $It$  [4]

Classe de inércia térmica	$It \text{ [kg/m}^2\text{]}$
Fraca	$It < 150$
Média	$150 \leq It \leq 400$
Forte	$It > 400$

## 2.2. REGULAMENTAÇÃO NO ÂMBITO DA TÉRMICA DE EDIFÍCIOS

### 2.2.1. DISPOSIÇÕES GERAIS

A Diretiva 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios, foi transposta através de três Decretos-Lei [11]:

- Decreto-Lei n.º78/2006, de 4 de abril, que aprovou o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior no Edifícios [12];
- Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de abril, que aprovou o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios [13];
- Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril, que aprovou o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [14].

Com o intuito de clarificar alguns dos princípios iniciais e introduzir novas disposições, de modo a reforçar o quadro de promoção do desempenho energético nos edifícios, face aos desafios e às metas acordados pelos Estados-Membros para 2020, a Diretiva n.º 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro de 2002, foi reformulada através da publicação da Diretiva n.º 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios [11].



Deste modo, foi possível melhorar a sistematização e o âmbito do sistema de certificação energética e respetivos regulamentos, bem como alinhar os requisitos nacionais às imposições explicitamente decorrentes da mesma. Assim, o Decreto-Lei n.º 118/2013 assegura não só a transposição da diretiva em referência, mas também uma revisão da legislação nacional, que se funde em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação, ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), atendendo, simultaneamente, aos interesses inerentes à aplicabilidade integral e utilidade deste quadro legislativo, e aos interesses de simplificação e clareza na produção legislativa de caráter predominantemente técnico [11].

A atualização da legislação nacional existente envolve alterações a diversos níveis, com relevância, na separação clara do âmbito de aplicação do REH e do RECS, passando o primeiro a incidir, exclusivamente, sobre os edifícios de habitação e o último sobre edifícios de comércio e serviços. Estas alterações facilitam o tratamento técnico e a gestão administrativa dos processos, ao mesmo tempo que reconhecem as especificidades técnicas de cada tipo de edifício naquilo que é mais relevante para a caracterização e melhoria do desempenho energético dos mesmos [11].

No caso de edifícios de habitação, a definição de requisitos e a avaliação de desempenho energético baseia-se na caracterização do comportamento térmico e na eficiência dos sistemas, concretizados em requisitos específicos para edifícios novos, edifícios sujeitos a grande intervenção e edifícios existentes, estando ainda previstos sistemas para aproveitamento de fontes de energia renováveis. Relativamente aos edifícios de comércio e serviços, acresce ainda a necessidade de especificar requisitos para a conceção de edifícios novos e edifícios sujeitos a intervenções, como a eficiência energética, sistemas de climatização, preparação de águas quentes sanitárias (AQS), sistemas de iluminação, sistemas de regulação, controlo e gestão técnica, elevadores e sistemas de energia renovável [11,15]

A utilização de fontes de energia renovável vem reforçar a importância do aproveitamento dos recursos naturais, em especial o recurso solar, abundantemente disponível no nosso país. Do mesmo modo, por via da definição de formas adequadas de quantificação, é incentivada a utilização de sistemas ou soluções passivas nos edifícios, bem como a otimização do desempenho em consequência de um menor recurso aos sistemas ativos de climatização [11].

Nesta conjuntura, surge o conceito de edifício com necessidades quase nulas de energia, o qual passará a constituir o padrão para a nova construção a partir de 2020, ou de 2018, no caso de edifícios novos de entidades públicas, bem como uma referência para as grandes intervenções no edificado existente. Este padrão conjuga a redução, na maior extensão possível e suportada numa lógica de custo-benefício, das necessidades energéticas do edifício, com o abastecimento energético através do recurso a energia de origem renovável [11].

Os sistemas de climatização a instalar em edifícios de comércio e serviços, devem cumprir os princípios de dimensionamento, requisitos gerais independentes do tempo de sistema instalado, requisitos específicos para os subsistemas de produção e distribuição de energia, em função do tipo de sistema ou equipamento e respetivas características técnicas, assim como requisitos de controlo, regulação e monitorização, conforme o descrito na Portaria n.º 349-D/2013[15], no sentido de promover o respetivo funcionamento otimizado em termos energéticos [11,15].

Relativamente ao SCE, este pretende estabelecer as categorias de edifícios, para efeitos de certificação energética, bem como os tipos de pré-certificados e certificados SCE e responsabilidade pela sua emissão, fixar as taxas de registo no SCE e, finalmente, estabelecer os critérios de verificação de qualidade dos processos de certificação do SCE, bem como os elementos que deverão constar do relatório e da anotação no registo individual do Perito Qualificado (PQ)[16].

De modo a assegurar os valores de caudal mínimo de ar novo previstos no RECS, os edifícios de comércio e serviços devem ser dotados de soluções para ventilação por meios naturais, meios mecânicos ou a combinação de ambos, respeitando o disposto na Portaria n.º 353-A/2013[8,16].

## 2.2.2. REGULAMENTO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS DE COMÉRCIO E SERVIÇOS

### 2.2.2.1. Generalidades

Como apresentado anteriormente, a legislação térmica de edifícios sofreu, ao longo dos últimos anos, algumas alterações no sentido de salvaguardar as necessidades de conforto térmico, sem recorrer excessivamente ao uso de energia e minimizar a ocorrência de efeitos patológicos derivados de condensações nos elementos da envolvente.

O RECS estabelece as regras a analisar no projeto de construção, alteração, operação e manutenção de edifícios de comércio e serviços e seus sistemas técnicos, bem como os requisitos para a caracterização do seu desempenho, no sentido de promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior. Relativamente ao comportamento térmico, os edifícios abrangidos neste regulamento, devem ser avaliados e sujeitos a requisitos, tendo em vista promover a melhoria do seu comportamento térmico, a prevenção de patologias e o conforto ambiente, incidindo para esse efeito nas características da envolvente opaca e envidraçada [11].

### 2.2.2.2. Zonamento Climático

O zonamento climático do País baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III, cuja composição por municípios tem por base o Decreto-Lei n.º 68/2008, de 14 de abril de 2008, entretanto alterado pelo Decreto-Lei n.º 85/2009, de 3 de abril e pela Lei n.º 21/2010 de 23 de agosto, e encontra-se detalhado na Tabela 01 do Despacho n.º 15793-F/2013 [17]. Adicionalmente, são definidas três zonas climáticas de inverno (I1, I2, I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2, V3) para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente.

As zonas climáticas de inverno são definidas a partir do número de graus-dia (GD) na base de 18°C, correspondente à estação de aquecimento, conforme a Tabela 2.4, e estão representadas graficamente na Figura 2.7. Quanto às zonas climáticas de verão são definidas a partir da temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento ( $\Theta_{ext,v}$ ) conforme a Tabela 2.5 e representado graficamente na Figura 2.8 [17].

Tabela 2.4 – Critérios para a determinação da zona climática de inverno [17]

<b>Critério</b>	<b>GD ≤ 1300</b>	<b>1300 &lt; GD ≤ 1800</b>	<b>GD &gt; 1800</b>
Zona	I1	I2	I3

Tabela 2.5- Critério para a determinação da zona climática de verão [17]

<b>Critério</b>	<b><math>\Theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}\text{C}</math></b>	<b><math>20^{\circ}\text{C} &lt; \Theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}\text{C}</math></b>	<b><math>\Theta_{ext,v} &gt; 22^{\circ}\text{C}</math></b>
Zona	V1	V2	V3

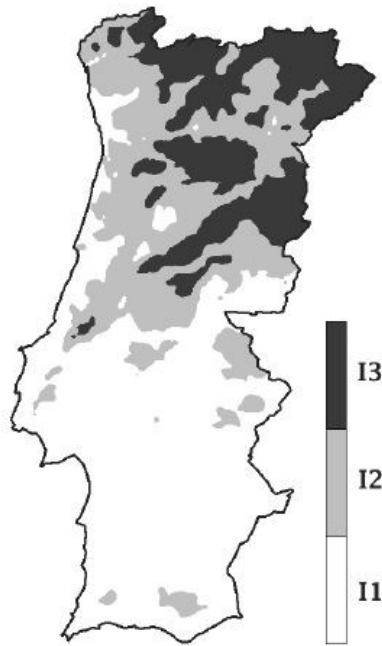


Figura 2.7- Zonas climáticas de inverno no continente [17]

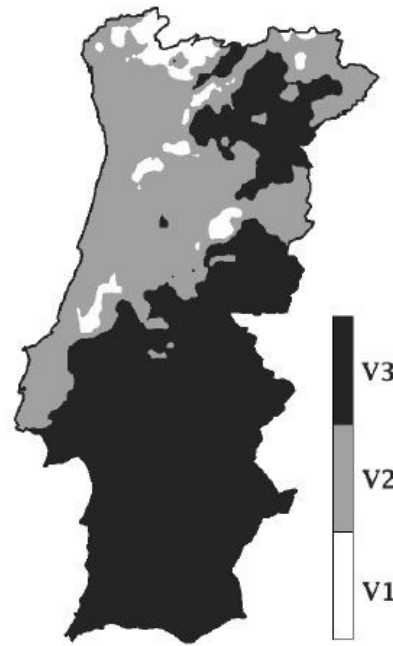


Figura 2.8- Zonas climáticas de verão no continente [17]

Os valores dos parâmetros climáticos  $X$  associados a um determinado local, são obtidos a partir de valores de referência para cada NUTS III e ajustados com base na altitude desse local,  $z$  [m]. Estas correções são do tipo linear, com declive  $a$ , proporcionais à diferença entre a altitude do local e uma altitude de referência  $z_{ref}$  [m] para a NUTS III, segundo a equação 2.7.

$$X = X_{ref} + a (z - z_{ref}) \text{ [meses ou } ^\circ\text{C]} \quad (2.7)$$

Os parâmetros climáticos mais pertinentes para a estação de aquecimento (inverno) são os seguintes:

- GD – Número de graus-dias, na base de  $18^\circ\text{C}$ , correspondentes à estação convencional de aquecimento,  $[\text{}^\circ\text{C}]$
- M – Duração da estação de aquecimento, [meses]
- $\Theta_{ext,i}$  – Temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento,  $[\text{}^\circ\text{C}]$
- $G_{sul}$  – Energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a sul,  $[\text{kWh/m}^2 \cdot \text{mês}]$

Em relação à estação de arrefecimento (verão), os parâmetros climáticos pertinentes são os seguintes:

- $L_v$  – Duração da estação, igual a 4 meses (2928 horas);
- $\Theta_{ext,v}$  – Temperatura exterior média,  $[\text{}^\circ\text{C}]$
- $I_{sol}$  – Energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal e em superfícies verticais para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais,  $[\text{kWh/m}^2]$

Todos os parâmetros de referência, assim como os declives para ajuste em altitude, encontram-se tabelados por NUT III, nas tabelas 04 e 05 do Despacho n.º 15793-F/2013[17].

### 2.2.2.3. Metodologia do RECS

Relativamente ao RECS, a generalidade dos requisitos energéticos é semelhante aos estabelecidos para edifícios de habitação (REH). Em relação ao comportamento térmico, os elementos e soluções construtivas de edifícios novos e grandes intervenções devem garantir a qualidade térmica da envolvente opaca, a fim de minimizar a ocorrência de patologias e considerar os fatores solares dos vãos envidraçados, com o intuito de reduzir o sobreaquecimento dos espaços [15,18].

Com vista a assegurar as condições de bem-estar e saúde dos ocupantes, foram estabelecidos na Portaria n.º 353-A/2013, valores mínimos de caudal de ar novo por espaço, em função da ocupação, das características do próprio edifício e dos seus sistemas de climatização e limiares de proteção para as concentrações de poluentes do ar interior [8].

Em relação aos requisitos energéticos, prevê-se a limitação de necessidade de aquecimento e arrefecimento para edifícios novos e intervenções que, para cumprimento regulamentar, deverão obedecer às condições apresentadas pelas equações 2.8 e 2.9.

$$N_{ic} \leq N_i \quad (2.8)$$

$$N_{vc} \leq N_v \quad (2.9)$$

onde,

$N_{ic}$	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$N_i$	Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$N_{vc}$	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$N_v$	Valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, [kWh/m <sup>2</sup> .ano]

O valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_i$ ) é determinado segundo a equação 2.10 [7].

$$N_i = \frac{(Q_{tr,iref} + Q_{ve,iref} - Q_{gu,iref})}{A_p} \quad [\text{kWh/m}^2.\text{ano}] \quad (2.10)$$

com:

$Q_{tr,iref}$	Transferência de calor por transmissão através da envolvente de referência na estação de aquecimento, [kWh]
$Q_{ve,iref}$	Transferência de calor por ventilação de referência na estação de aquecimento, [kWh]
$Q_{gu,iref}$	Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento de referência, [kWh]
$A_p$	Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m <sup>2</sup> ].

De acordo com o regulamento, estes parâmetros são determinados segundo o exposto de seguida [7,15]:

- O valor de referência da transferência de calor por transmissão através da envolvente deve ser determinado considerando os coeficientes de transmissão térmica superficial de referência,  $U_{ref}$  de elementos opacos e de vãos envidraçados para edifícios de comércio e serviços, expostos na Tabela 2.6, e estabelecidos na Portaria n.º349-D/2013[15], em função do tipo da envolvente e da zona climática, e os coeficientes de transmissão linear ( $\psi_{ref}$ ) indicados na Portaria n.º349-B/2013[7].

- ii) O valor de referência de calor por ventilação através da envolvente,  $Q_{ve,iref}$ , deve ser determinado considerando uma taxa de renovação de ar de referência ( $R_{ph,ref}$ ) igual à taxa de renovação para o edifício em estudo, segundo o apresentado anteriormente em 2.1.3.3 e calculado através da equação 2.5 e da Tabela 2.1[15].
- iii) O cálculo dos ganhos de calor úteis  $Q_{gu,iref}$ , deve ser determinado, considerando os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar ( $Q_{sol,i}=G_{sul} \times 0,182 \times 0,20 A_p$ ) e ganhos térmicos internos, e considerando o fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento de referência unitário ( $\eta_{iref} = 0,60$ ).

Tabela 2.6- Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados para edifícios de comércio e serviços,  $U_{ref}$  [W/(m<sup>2</sup>.°C)] [15]

	Zona Climática		
Portugal Continental			
Zona corrente da envolvente	I1	I2	I3
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,70	0,60	0,50
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,50	0,45	0,40
Vão envidraçados exteriores (porta e janelas)	4,30	3,30	3,30
Regiões Autónomas			
Zona corrente da envolvente	I1	I2	I3
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	1,40	0,90	0,50
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,80	0,60	0,40
Vão envidraçados exteriores (porta e janelas)	4,30	3,30	3,30

O valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento ( $N_v$ ) de um edifício deve ser calculado de acordo com a seguinte equação 2.11[7].

$$N_v = \frac{(1-\eta_{ref}) \cdot Q_{g,vref}}{A_p} \text{ [kWh/m}^2\text{.ano]} \quad (2.11)$$

com:

- $\eta_{vref}$  Fator de utilização de ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento
- $Q_{g,vref}$  Ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento, [kWh];
- $A_p$  Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>].

Sendo estes parâmetros determinados segundo o exposto de seguida [7,15]:

- i) O fator de utilização de ganhos de referência na estação de arrefecimento é dado pela equação 2.12:

$$\eta_{v_{ref}} = \begin{cases} 0,52 + 0,22 \ln \Delta\theta, & \Delta\theta > 1 \\ 0,45, & 0 < \Delta\theta \leq 1 \\ 0,30, & \Delta\theta \leq 0 \end{cases} \text{ e } \Delta\theta = \theta_{ref,v} - \theta_{ext,v} \quad (2.12)$$

em que:

$\theta_{ref,v}$  Temperatura interior de referência na estação de arrefecimento, contabilizada em 25°C  
 $\theta_{ext,v}$  Temperatura exterior média na estação de arrefecimento no local, de acordo com o Despacho n.º 15793-F/2013 [17]

- ii) Os ganhos térmicos de referência na estação de arrefecimento, são dados pela equação 2.13 seguinte, tendo em conta os parâmetros de referência abaixo indicados:

$$\frac{Q_{g,vref}}{A_p} = \left[ q_{int} \cdot \frac{L_v}{1000} + g_{vref} \left( \frac{A_w}{A_p} \right)_{ref} I_{sol,ref} \right] \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad (2.13)$$

em que:

$q_{int}$  Ganhos internos médios, contabilizados em 7 W/m<sup>2</sup> <sup>4</sup>[14]  
 $I_{sol,ref}$  Radiação solar média de referência, correspondente à radiação incidente numa superfície orientada a oeste, de acordo com o Despacho n.º 15793-F/2013 [17], [kWh/(m<sup>2</sup>.ano)]  
 $L_v$  Duração da estação de arrefecimento, contabilizada em 2928 horas.  
 $(A_w/A_p)$  Razão entre a área de vãos e a área interior útil de pavimento, que se assume igual a 20%.  
 $g_{vref}$  Fator solar de referência para a estação de arrefecimento, definido na Tabela 2.7.

Tabela 2.7- Fator solar dos vãos envidraçados de referência para edifícios de comércio e serviços [15]

	Zona Climática		
	V1	V2	V3
Fator solar do vão (sem dispositivos de sombreamento)	0,25	0,20	0,15

Os elementos da zona corrente da envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços, deverão ter um coeficiente de transmissão térmica, U, não superior aos valores tabelados na Portaria n.º 349-D/2013 (Tabela 2.8)[15].

<sup>4</sup> Uma vez que no RECS não se encontra referida a quantificação dos ganhos térmicos internos médios para salas de aula, contabilizou-se 7 W/m<sup>2</sup>, uma vez que é o valor estabelecido no anterior regulamento (RCCTE) [14].

Tabela 2.8- Valores do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [W/m<sup>2</sup>.°C] [15]

Elemento em zona corrente da envolvente	Zona Climática		
	I1	I2	I3
Elemento opaco vertical	1,75	1,60	1,45
Elemento opaco horizontal	1,25	1,00	0,90

Os vãos envidraçados horizontais e verticais não orientados no quadrante Norte *inclusive*, devem apresentar um fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis, totalmente ativos ( $g_T$ ), que obedeça à seguinte equação 2.14[15]:

$$g_T \cdot F_o \cdot F_f \leq g_{T_{\max}} \quad (2.14)$$

em que:

- $g_T$  Fator solar global do vão envidraçado com todos os dispositivos de proteção solar, permanentes ou móveis, totalmente ativos
- $F_o$  Fator de sombreamento por elementos horizontais sobrejacentes ao envidraçado, compreendendo pelas palas e varandas
- $F_f$  Fator de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado, compreendendo pelas palas verticais, outros corpos ou partes de um edifício
- $g_{T_{\max}}$  Fator solar global máximo admissível dos vãos envidraçados, obtido pela Portaria n.º 349-D/2013 [15] (Tabela 2.9)

Tabela 2.9- Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados de edifícios de comércio e serviços,  $g_{T_{\max}}$  [15]

$g_{T_{\max}}$ por zona climática		
V1	V2	V3
0,56	0,56	0,50

No caso em que a soma da área dos vãos envidraçados verticais por orientação seja superior a 30% da área da fachada onde estes se inserem, deverá ser verificada, em substituição da equação anterior (2.14) a seguinte equação, por fachada (2.15)[15]:

$$g_T \cdot F_o \cdot F_f \leq g_{T_{\max}} \cdot \frac{0,30}{\left(\frac{A_{env}}{A_{eve}}\right)} \quad (2.15)$$

em que:

- $A_{env}$  Soma das áreas dos vãos envidraçados do edifício ou fração em estudo, por orientação, [m<sup>2</sup>]
- $A_{eve}$  Área da envolvente vertical exterior do edifício ou fração em estudo, por orientação, [m<sup>2</sup>]

Esta condição não se aplica a Pequenos Edifícios de Comércio e Serviços (PES), sendo que, no caso dos Grandes Edifícios de Comércio e Serviços (GES), esse requisito poderá ser dispensado pelo técnico autor do projeto, mediante evidência de que o cumprimento de tal condição, conduz a um aumento dos consumos energéticos em relação a uma solução que cumpra a condição prevista na equação 2.14[15].

Calculados os valores máximos admissíveis das necessidades nominais anuais de energia para aquecimento e arrefecimento, que correspondem à situação de referência, é necessário definir as necessidades nominais anuais de energia para aquecimento e arrefecimento do edifício real em estudo. As expressões que permitem calcular esses valores correspondem às equações 2.3 e 2.4, respetivamente, expostas no subcapítulo 2.1.3.1.

### Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, $N_{ic}$

De seguida, será apresentada a metodologia de cálculo das perdas e dos ganhos na estação de aquecimento, cujos parâmetros se encontram determinados no Despacho n.º 15793-K/2013[4].

Ao longo da estação de aquecimento, e face à diferença de temperatura entre o exterior e o interior dos edifícios, a transferência de calor por transmissão global, que ocorre através da envolvente, traduz-se em perdas de calor calculadas de acordo com a seguinte equação 2.16[5]:

$$Q_{tr,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{tr,i} \text{ [kWh]} \quad (2.16)$$

onde:

GD Número de graus-dia de aquecimento especificados para cada região NUTS III, [°C.dia]

$H_{tr,i}$  Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de aquecimentos, [W/°C]

As perdas de calor por ventilação correspondentes à renovação do ar interior durante a estação de aquecimento são calculadas de acordo com a equação 2.17 [5]:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \cdot GD \cdot H_{ve,i} \text{ [kWh]} \quad (2.17)$$

onde

$$H_{ve,i} = 0,34 \cdot R_{ph,i} \cdot A_p \cdot P_d \text{ [W/°C]} \quad (2.18)$$

em que:

$H_{ve,i}$  Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, [W/°C]

$R_{ph,i}$  Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de aquecimento, [h<sup>-1</sup>]

$A_p$  Área interior útil de pavimentos, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>]

$P_d$  Pé direito médio da fração, [m]

Os ganhos térmicos úteis resultam em parte, da conversão de ganhos térmicos brutos, expressa de acordo com a equação 2.19 [5]:

$$Q_{gu,i} = \eta_i \cdot Q_{g,i} \text{ [kWh]} \quad (2.19)$$



em que:

$\eta_i$  Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento

$Q_{g,i}$  Ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, [kWh]

Os ganhos brutos a considerar no cálculo das necessidades nominais de aquecimento do edifício têm duas origens, ganhos térmicos associados a fontes internas de calor,  $Q_{int,i}$  e ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados na estação de aquecimento,  $Q_{sol,i}$ , como se pode verificar na equação seguinte (2.20) [5]:

$$Q_{g,i} = Q_{int,i} + Q_{sol,i} \text{ [kWh]} \quad (2.20)$$

Os ganhos internos são calculados durante toda a estação de aquecimento, de acordo com a equação 2.21[5]:

$$Q_{int,i} = 0,72 q_{int} \cdot M \cdot A_p \text{ [kWh]} \quad (2.21)$$

onde:

$q_{int}$  Ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, [W/m²]

$M$  Duração média da estação convencional de aquecimento, [mês]

$A_p$  Área interior útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m²]

Relativamente ao cálculo dos ganhos solares brutos, através dos vãos envidraçados na estação de aquecimento, deve ser efetuado segundo metodologia abaixo indicada (equação 2.22) [5]:

$$Q_{sol,i} = G_{sul} \cdot \sum_j \left[ X_j \cdot \sum_n F_{s,i_{nj}} \cdot A_{s,i_{nj}} \right] \cdot M \text{ [kWh]} \quad (2.22)$$

em que:

$G_{sul}$  Valor médio mensal de energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a sul, durante a estação de aquecimento, por unidade de superfície, [kWh/m².mês]

$X_j$  Fator de orientação para as diferentes exposições de acordo com a Tabela 2.10.

$F_{s,i_{nj}}$  Fator de obstrução do vão envidraçado  $n$  com orientação  $j$  na estação de aquecimento

$A_{s,i_{nj}}$  Área efetiva coletora de radiação solar do vão envidraçado na superfície  $n$  com orientação  $j$ , [m²]

$j$  Índice que corresponde a cada uma das orientações

$n$  Índice que corresponde a cada uma das superfícies com orientação  $j$

$M$  Duração média da estação convencional de aquecimento, [mês]

Tabela 2.10- Fator de orientação para as diferentes exposições,  $X_j$

Orientação do vão (j)	N	NE/NW	S	SE/SW	E/W	H
$X_j$	0,27	0,33	1	0,84	0,56	0,89

O valor da área efetiva coletora  $A_{s,i}$  deve ser calculado vão a vão, de acordo com a equação 2.23 [5]:

$$A_{s,i_{nj}} = A_w \cdot F_g \cdot g_i \quad [\text{m}^2] \quad (2.23)$$

onde:

$A_w$  Área total do envidraçado, incluindo o vidro e caixilho,  $[\text{m}^2]$   
 $F_g$  Fração envidraçada do vão envidraçado, obtida de acordo com o Despacho n.º 15793-K/2013[4].  
 $g_i$  Fator solar de inverno

### Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, $N_{vc}$

Terminado o cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, é necessário de seguida proceder ao cálculo das perdas e dos ganhos na estação de arrefecimento, que deve ser aplicado de acordo com o definido no Despacho n.º 15793-I/2013 [5]. A metodologia de cálculo do fator de utilização de ganhos térmicos é estabelecida de acordo com o definido no despacho que procede à publicação dos parâmetros térmicos, em função da transferência ao longo da estação de arrefecimento, que ocorre por transmissão,  $Q_{tr,v}$ , e devido à renovação de ar,  $Q_{ve,v}$ , bem como do ganhos térmicos na estação de arrefecimento,  $Q_{g,v}$ , que serão descritos de seguida [5].

A transferência de calor por transmissão através da envolvente calcula-se de acordo com a equação 2.24 [5]:

$$Q_{tr,v} = \frac{H_{tr,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot L_v}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (2.24)$$

em que:

$H_{tr,v}$  Coeficiente global de transferência de calor por transmissão na estação de arrefecimento,  $[\text{W}/^\circ\text{C}]$   
 $\theta_{v,ref}$  Temperatura de referência para o cálculo das necessidade de energia na estação de arrefecimento, igual a  $25^\circ\text{C}$   
 $\theta_{v,ext}$  Temperatura média do ar exterior para a estação de arrefecimento,  $[\text{C}]$   
 $L_v$  Duração da estação de arrefecimento igual a 2928 horas

A transferência de calor correspondente à renovação de ar interior durante a estação de arrefecimento,  $Q_{ve,v}$ , determina-se segundo a equação 2.25 [5]:

$$Q_{ve,v} = \frac{H_{ve,v} \cdot (\theta_{v,ref} - \theta_{v,ext}) \cdot L_v}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad (2.25)$$

onde:

$$H_{ve,v} = 0,34 \cdot R_{ph,v} \cdot A_p \cdot P_d \quad [\text{kWh}] \quad (2.26)$$

em que:

- $H_{ve,v}$  Coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento, [kWh]  
 $R_{ph,v}$  Taxa nominal de renovação do ar interior na estação de arrefecimento, [h<sup>-1</sup>]  
 $A_p$  Área interior útil de pavimento, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>]  
 $P_d$  Pé direito médio da fração, [m]

Em relação aos ganhos térmicos brutos, estes são obtidos por duas parcelas, ganhos térmicos associados a fontes internas de calor,  $Q_{int,v}$ , e ganhos internos associados à radiação solar incidente na envolvente exterior opaca e envidraçada,  $Q_{sol,v}$ , conforme a seguinte equação 2.27 [5]:

$$Q_{g,v} = Q_{int,v} + Q_{sol,v} \text{ [kWh]} \quad (2.27)$$

Os ganhos térmicos internos devidos aos ocupantes, aos equipamentos, e aos dispositivos de iluminação durante toda a estação de arrefecimento calculam-se de acordo com a seguinte equação 2.28[5]:

$$Q_{int,v} = \frac{q_{int} \cdot A_p \cdot L_v}{1000} \text{ [kWh]} \quad (2.28)$$

onde:

- $q_{int}$  Ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície, [W/m<sup>2</sup>]  
 $A_p$  Área interior útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m<sup>2</sup>]  
 $L_v$  Duração da estação de arrefecimento igual a 2928 horas

Os ganhos solares resultantes da radiação solar incidente na envolvente opaca e envidraçada, calculam-se segundo a equação 2.29 , sendo que a determinação do fator de obstrução de superfícies opacas é opcional devendo, quando considerado, seguir uma abordagem comum à dos vãos envidraçados [5]:

$$Q_{sol,v} = \sum_j \left[ G_{sol,j} \sum_n F_{s,v_{nj}} A_{s,v_{nj}} \right] \text{ [kWh]} \quad (2.29)$$

em que:

- $G_{sol,j}$  Energia solar média incidente numa superfície com orientação  $j$  durante toda a estação de arrefecimento, [kWh/m<sup>2</sup>]  
 $F_{s,v_{nj}}$  Fator de obstrução da superfície do elemento  $n$ , com a orientação  $j$   
 $A_{s,v_{nj}}$  Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento  $n$  com orientação  $j$ , [m<sup>2</sup>]  
 $j$  Índice correspondente a cada uma das orientações por octante e à posição horizontal  
 $n$  Índice correspondente a cada um dos elementos opacos e envidraçados com orientação  $j$

A área efetiva coletora de radiação solar de cada vão envidraçado  $n$  com orientação  $j$ , deve ser calculada através da equação 2.30 seguinte , aplicável a espaços úteis e não úteis [5]:

$$A_{s,v_{nj}} = A_w \cdot F_g \cdot g_v \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.30)$$

em que:

- $A_w$  Área total do vão envidraçado, incluindo o vidro e o caixilho, [m<sup>2</sup>]  
 $F_g$  Fração envidraçada do vão envidraçado, obtida de acordo com o Despacho n.º15793-K/2013[4]  
 $g_v$  Fator solar do envidraçado na estação de arrefecimento

A área efetiva coletora de radiação solar de um elemento  $n$  da envolvente opaca exterior, com orientação  $j$  é calculada através da seguinte equação 2.31 , aplicável a espaços úteis e não úteis [5]:

$$A_{s,vnj} = \alpha \cdot U \cdot A_{op} \cdot R_{se} \quad [m^2] \quad (2.31)$$

onde:

- $\alpha$  Coeficiente de absorção de radiação solar da superfície do elemento da envolvente opaca (Tabela 2.11)  
 $U$  Coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente opaca, [W/m<sup>2</sup>]  
 $A_{op}$  Área do elemento da envolvente opaca exterior, [m<sup>2</sup>]  
 $R_{se}$  Resistência térmica superficial exterior igual a 0,04 W/(m<sup>2</sup>.°C)

Tabela 2.11 – Coeficiente de absorção da radiação solar [4]

Cor	$\alpha$
Clara (branco, creme, amarelo, laranja, vermelho-claro)	0,40
Média (vermelho-escuro, verde-claro, azul-claro)	0,50
Escura (castanho, verde-escuro, azul-vivo, azul-escuro)	0,80

Em suma, para verificar o cumprimento legislativo, é necessário, primeiramente, proceder à caracterização do zonamento climático onde se insere o edifício. Posto isto, procede-se ao cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento e arrefecimento, e comparar-se esse valor com o máximo, calculado através dos valores de referência definidos na Portaria n.º 349-D/2013 [15]. Deste modo, é possível verificar que existe cumprimento legislativo, quando os valores cumprem a condição apresentada na equação 2.8 (estação de aquecimento) e a condição da equação 2.9 (estação de arrefecimento).

## 2.3. RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo encontra-se dividido em duas partes, relacionados com o tema geral “Térmica de Edifícios”. Primeiramente, expõem-se noções teóricas básicas, ligadas aos fenómenos decorrentes em edifícios e, posteriormente, apresenta-se a regulamentação em vigor no âmbito da térmica de edifício, com foco no Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Relativamente às noções teóricas, indispensáveis para compreender os fenómenos que ocorrem nos edifícios, referem-se os três principais mecanismos de transmissão de calor: a condução, a convecção e a radiação.

As trocas de calor em edifícios podem classificar-se em perdas ou ganhos de calor, que permitem calcular o balanço energético no edifício, em dois períodos distintos, inverno e verão, uma vez que o fluxo de calor altera a direção nessas épocas, através do cálculo dos parâmetros,  $H_{tr,i}$  e  $H_{tr,v}$  que permitem determinar as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento e para arrefecimento,  $N_{ic}$  e  $N_{vc}$ .

As trocas de calor por condução ocorrem, maioritariamente através das zonas correntes, pontes térmicas e através do contacto com o solo. Por outro lado, e para que se garantam condições de higiene e salubridade do ar interior, é indispensável que os edifícios sejam ventilados naturalmente, mecanicamente ou de forma mista, que se traduz em trocas de calor por renovação do ar entre o interior e o exterior implicando um acréscimo de energia para manter as condições interiores nos níveis de conforto desejados, como se pode verificar através do cálculo das necessidades nominais de energia útil.

A radiação solar incidente nos envidraçados constitui um ganho de calor no edifício, o que para as condições de inverno, pode ser tido como uma vantagem que terá de ser minimizada no verão de modo a não ocorrer sobreaquecimento. Da radiação total incidente, uma parte é refletida imediatamente para o exterior, outra é refletida para o interior do local e uma terceira parte é absorvida pelo vidro.

Outro tipo de ganhos a que um edifício se encontra sujeito é através de ganhos internos resultantes da ocupação do edifício pelas pessoas, que libertam calor em resultado da sua atividade metabólica, dos sistemas de iluminação elétrica e dos restantes equipamentos elétricos instalados que dissipam calor em resultado do seu funcionamento. Aparelhos como fogões, caldeiras ou esquentadores a gás também são contabilizados.

Para que haja uma maior estabilidade das temperaturas interiores relativamente às oscilações térmicas do exterior, permitindo uma utilização racional de energia, é importante que conhecer a massa dos elementos de construção, a condutibilidade térmica dos materiais e o seu calor específico, de modo a quantificar a inércia térmica de um edifício e garantir a sua capacidade de armazenar calor, libertando-o ao longo do tempo.

A legislação térmica dos edifícios sofreu, ao longo dos últimos anos, algumas alterações no sentido de salvaguardar as necessidades de conforto térmico, sem recorrer excessivamente ao uso de energia e minimizando a ocorrência de efeitos patológicos provocados por condensações nos elementos da envolvente.

Deste modo, o Decreto-Lei n.º 118/2013 assegura uma revisão da legislação nacional, que se funde em melhorias ao nível da sistematização e âmbito de aplicação ao incluir, num único diploma, o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), atendendo, simultaneamente, aos interesses inerentes à aplicabilidade integral e utilidade deste quadro legislativo, e aos interesses de simplificação e clareza na produção legislativa de caráter predominantemente técnico.

Para o presente trabalho, o regulamento mais relevante será o RECS, uma vez que se pretende proceder ao estudo do desempenho térmico de uma sala de aula, alvo de intervenção com materiais de desperdício.

O RECS estabelece as regras a analisar no projeto de construção, alteração, operação e manutenção de edifícios de comércio e serviços e seus sistemas técnicos, bem como os requisitos para a caracterização do seu desempenho, no sentido de promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior. Relativamente ao comportamento térmico, os edifícios abrangidos neste regulamento devem ser avaliados e sujeitos a requisitos, tendo em vista promover a melhoria do seu comportamento térmico, a prevenção de patologias e o conforto ambiente, incidindo para esse efeito nas características da envolvente opaca e envidraçada.

De modo a proceder à verificação regulamentar, prevê-se a limitação de necessidades de aquecimento e arrefecimento para edifícios novos e intervenções que devem obedecer às condições apresentadas pelas equações 2.8 e 2.9.

Importa ainda referir que, de acordo com o local onde se insere o edifício, é necessário definir o seu zonamento climático, que se baseia na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III e que se encontra detalhada no Despacho n. °15793-F/2013.

# 3

## ISOLAMENTOS TÉRMICOS

### 3.1. SELEÇÃO EXIGENCIAL DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS

#### 3.1.1. INTRODUÇÃO

Um isolamento térmico tem como função principal a melhoria da resistência térmica da envolvente do edifício, de forma a reduzir as trocas de calor entre o exterior e o interior, reduzindo as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Consideram-se isolamentos térmicos leves, materiais cuja condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) seja inferior a 0,065 W/(m.°C) e a resistência térmica ( $R = \frac{e}{\lambda}$ ) seja maior ou igual a 0,5 m².°C/W [19].

#### 3.1.2. CLASSIFICAÇÃO DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS

Os isolamentos térmicos podem ser classificados segundo o modo de produção, a estrutura, a apresentação e a natureza das matérias primas.

Relativamente à classificação segundo o modo de produção, os isolamentos podem ser divididos em dois grupos [19]:

- i) Isolamentos pré-fabricados:
  - placas/painéis: elementos cujas dimensões, “comprimento” e “largura”, são preponderantes relativamente à “espessura” e que se definem pelo seu carácter rígido (podem, ou não, comportar revestimentos nas faces);
  - mantas: elementos onde as dimensões, “comprimento” e “largura”, são preponderantes relativamente à “espessura” e que se definem pelo seu carácter não rígido (podem, ou não, comportar revestimentos nas faces);
  - blocos: elementos em que a “espessura” é da mesma ordem de grandeza das outras dimensões e que se definem pelo seu carácter rígido.
- ii) Isolamentos formados *in situ*:
  - Isolamentos a granel;
  - Isolamentos moldados;
  - Isolamentos injetados/projetados.

Os isolamentos pré-fabricados podem ser aplicados por fixação mecânica, por colagem ou por colocação livre ou em cofragem perdida.

No que se refere à estrutura, os materiais podem ser classificados como materiais celulares, fibrosos ou granulares. Os materiais celulares contêm ar encerrado em alvéolos, como é o caso de aglomerados de cortiça, betões celulares e espumas de plásticos. Os materiais fibrosos mantêm uma película de ar aderente à extensa superfície de cada fibra, como por exemplo a lã de rocha e a lã de vidro e, por último, os materiais granulares que retêm o ar nos intervalos entre grânulos e nos interstícios como os granulados de cortiça soltos, vermiculite solta ou aglomerada [19].

Quanto à apresentação, os isolamentos podem ser materiais rígidos, semirrígidos, granulares/pulverulentos ou pastosos e em relação à natureza das matérias-primas, estas dividem-se em natureza mineral, vegetal ou sintética [19].

### 3.1.3. CARATERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS

A condutibilidade térmica é uma propriedade que caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogêneos, e que representa a quantidade de calor expressa em [W] por unidade de área [ $\text{m}^2$ ] que atravessa uma espessura unitária [m] de um material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] [20].

Esta propriedade depende de fatores como a porosidade, a dimensão dos poros, o diâmetro das fibras, o caráter isotrópico/anisotrópico, o envelhecimento e tipo de gás que o material encerra. No entanto, os fatores mais importantes são a temperatura, a massa volúmica e o teor de humidade [19].

Existem ainda outras características físicas importantes como a massa volúmica aparente ou absoluta, o coeficiente de dilatação térmica linear, o coeficiente de absorção sonora e o calor específico, sendo de destacar o coeficiente de dilatação térmica linear e a massa volúmica [19].

Outro aspeto fundamental na caracterização do desempenho de um isolamento térmico é compreender o seu funcionamento face à água, nomeadamente quanto à [19]:

- absorção de água por gravidade, capilaridade, imersão e aspersão;
- impermeabilidade;
- higroscopicidade;
- caráter não hidrófilo;
- imputrescibilidade;
- intumescimento;
- possibilidade de dissolução de aditivos eventualmente existentes.

O coeficiente de permeabilidade ao vapor de água de um material homogêneo representa a quantidade de vapor de água que, por unidade de tempo e espessura, atravessa por difusão um provete desse material, quando sujeito a uma diferença de pressão de vapor unitária entre as suas faces. Expressa-se em  $\text{kg}/(\text{m.s.Pa})$  ou  $\text{g}/(\text{m.h.mmHg})$  e o seu conhecimento é indispensável para uma correta conceção da envolvente face à difusão de vapor [19,21].

Um isolamento térmico, enquanto elemento da envolvente, exposto frequentemente a ações exteriores como chuva, radiação solar, neve, vento, ciclos de gelo/degelo, deve ser suficientemente resistente a degradações por elas provocadas. De referir que, para aumentar a sua resistência à ação dos agentes exteriores, os isolamentos podem incluir na sua composição aditivos específicos [19].



Por razões de segurança, o conhecimento do comportamento face ao fogo é fundamental, nomeadamente o risco de deflagração, a temperatura limite de utilização, a libertação de fumos e de gases tóxicos. Importa ainda conhecer se o isolamento liberta substâncias durante a combustão que permitam a propagação do incêndio ou se é nocivo para pessoas. Assim, como anteriormente referido, o isolamento pode ter na sua constituição aditivos ignífugos que dificultem a combustão [19].

O comportamento mecânico representa uma característica importante dos isolamentos térmicos, especialmente quando este se encontra sujeito a ações mecânicas/térmicas exteriores, como ações climatéricas que podem provocar alterações irreversíveis nos isolamentos. Deste modo, é importante conhecer a resistência à compressão, flexão, tração, corte, choque, punçoamento, ações dinâmicas e deformação com carga permanente. Geralmente, a resistência mecânica é proporcional à massa volumica, sendo influenciada pelo seu caráter isotrópico/anisotrópico [22].

Quando o isolamento se encontra ligado a outros materiais, deve ser estudada a sua estabilidade dimensional. Importa conhecer a retração após o fabrico e a estabilidade dimensional sob a ação da temperatura e/ou humidade. Importa ainda que haja uma compatibilização dos materiais, medida, por exemplo, pelo pH, a resistência a ácidos, a bases e a possibilidade de corrosão de metais [19].

Face às exigências atuais, impõe-se uma limitação quanto ao impacto das atividades humanas no meio ambiente e no próprio Homem, o que torna fundamental avaliar a possibilidade de um isolamento térmico causar alergias, libertar odores e substâncias nocivas, assegurar a segurança na utilização e no uso, estimar o consumo de energia e conhecer a possibilidade de reciclagem [19].

Na escolha de um isolamento térmico pode, eventualmente, haver outras características que sejam relevantes enumerar, como o custo de aquisição, o tempo de vida útil, a versatilidade, o conforto visual, a conformidade com a regulamentação técnica, o controlo de qualidade na produção, etiquetagem e a existência de informação técnica [19].

### 3.1.4. CERTIFICAÇÃO DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS

#### 3.1.4.1. Introdução

A certificação de isolamentos térmicos permite caracterizar os materiais e proceder a uma seleção exigencial dos isolamentos.

De seguida, será apresentada a certificação sugerida pela Nota de Informação Técnica (NIT) 001[19], baseada na ACERMI (*Association pour la Certification des Matériaux Isolants*). A certificação preconizada aplicar-se-á a produtos de isolamento pré-fabricados constituídos por painéis, placas e mantas, com ou sem revestimentos delgados, em que a resistência térmica,  $R$ , é maior ou igual a 0,5 m<sup>2</sup>.°C/W e a condutibilidade térmica,  $\lambda$ , é menor ou igual a 0,065 W/(m.°C) [19].

Importa ainda referir que os produtos não homogêneos, como por exemplo, placas de gesso com isolamento, não podem ser certificados, embora o isolamento em si, possa [19].

Preconizam-se dois graus de certificação [19]:

- Certificação tipo “A”: define a resistência térmica,  $R$ , do elemento e garante os níveis mínimos,  $I_1$ ,  $S_1$ ,  $O_1$ ,  $L_1$ ,  $E_1$ , de aptidão de utilização;
- Certificação tipo “B”: define a resistência térmica,  $R$ , e os níveis de aptidão de utilização (ISOLE).

As exigências constantes da certificação são as seguintes [19]:

- R- Resistência térmica
- I- Compressibilidade
- S- Estabilidade dimensional
- O- Comportamento à água
- L- Comportamento mecânico
- E- Permeabilidade ao vapor de água

De seguida, são apresentados vários níveis de aptidão de utilização para cada exigência. De realçar que um material só pertence a determinado nível, se satisfizer todas as exigências dos níveis inferiores.

#### 3.1.4.2. Compressibilidade – I

Um isolamento térmico com maior ou menor compressibilidade pode ser classificado em cinco níveis, em função da sua deformação (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Níveis de compressibilidade [19]

Nível	Deformação
I <sub>1</sub>	$\Delta e/e \leq 25\%$
I <sub>2</sub>	$C \leq 12 \text{ mm}$
I <sub>3</sub>	$C \leq 3 \text{ mm}$
I <sub>4</sub>	$C \leq 0,5 \text{ mm}$
I <sub>5</sub>	$C \leq 0,3 \text{ mm}$

onde:

$\Delta e/e$  Variação relativa de espessura sob pressão de 100 Pa, em relação a uma pressão inicial de 50 Pa, conforme NF B 20-101 (não são admitidos valores individuais superiores a 35%).

C Perda de espessura após aplicação progressiva, por patamares (24h), de uma pressão de 0,01 MPa até 0,04 MPa, conforme NF P 75-301 [mm].

#### 3.1.4.3. Estabilidade dimensional – S

Os materiais de isolamento térmico podem ser subdivididos em quatro níveis de estabilidade dimensional, conforme as exigências especificadas de seguida (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Níveis de estabilidade dimensional [19]

Nível	Exigências
S <sub>1</sub>	$ S_n  +  V_{HR}  \leq 0,01 \text{ m/m}$
S <sub>2</sub>	$G \cdot  S_n  \cdot e \leq 400 \text{ Pa.m}$
S <sub>3</sub>	$ S_f  \leq 0,004^{(*)} \text{ m/m}$
S <sub>4</sub>	$(50 \cdot \alpha +  V_{HR}  +  S_f ) \cdot G \leq 15 \times 10^3 \text{ Pa}$
(*) sem valores individuais > 0,0045 m/m	

em que:

- $S_n$  Retração ou dilatação natural relativa, a partir da saída da fábrica, [m/m]  
 $S_f$  Retração ou dilatação a 20 °C, após aquecimento a 70 °C durante 7 dias, [m/m]  
 $V_{HR}$  Variações dimensionais relativas em função da humidade relativa entre dois ambientes a 20 °C/ 15%HR e 20°C/ 90%HR, [m/m]  
 $\alpha$  Coeficiente de dilatação térmica linear, [°C<sup>-1</sup>]  
 $G$  Módulo de elasticidade transversal, obtido conforma NF T 56-118, [Pa].  
 $e$  Espessura do isolamento, [m]

#### 3.1.4.4. Comportamento à água líquida – O

O comportamento à água líquida dos materiais de isolamento térmico permite classificá-los em três níveis (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Níveis de comportamento à água líquida [19]

Nível	Exigências
<b>O<sub>1</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variação de espessura após humidificação parcial<sup>(1)</sup> &lt; 7,5 %</li> <li>Teor de humidade higroscópico<sup>(2)</sup> (% em peso) &lt; 15 %</li> <li>Teor de humidade higroscópico<sup>(2)</sup> (% em volume) &lt; 1,5 %</li> </ul>
<b>O<sub>2</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não hidrófilo<sup>(3)</sup></li> </ul>
<b>O<sub>3</sub></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impermeabilidade à água em ensaio de absorção por gravidade (em 24h)<sup>(4)</sup></li> <li>Teor de humidade higroscópico<sup>(2)</sup> (% em volume) &lt; 0,05 %</li> </ul>
<sup>(1)</sup> projeção de um litro de água sobre um provete de 0,35 x 0,35 m e medição da espessura sob a ação de 50 Pa <sup>(2)</sup> o teor de humidade higroscópico é obtido pela diferença entre dois ambientes: 15% e 90% <sup>(3)</sup> conforme NF P 75-305 <sup>(4)</sup> conforme NF P 75-302	

#### 3.1.4.5. Comportamento mecânico – L

O comportamento dos materiais de isolamento térmico, em coesão e flexão, permite classificá-los em quatro níveis (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Níveis de comportamento mecânico em coesão e flexão [19]

Nível	Exigências
<b>L<sub>1</sub></b>	$R_L > P$
<b>L<sub>2</sub></b> <sup>(1)</sup>	$D \leq 0,12 \text{ m}$
<b>L<sub>3</sub></b> <sup>(2)</sup>	$R_t \geq 0,05 \text{ MPa}$ $A_r \geq 1,5 \%$
<b>L<sub>4</sub></b> <sup>(3)</sup>	$R_t \geq 0,18 \text{ MPa}$ $A_r \geq 1 \%$
<sup>(1)</sup> define o limite de inclusão na família dos isolamentos semirrígidos <sup>(2)</sup> valores a satisfazer por pelo menos 95% dos provetes <sup>(3)</sup> valores a satisfazer por pelo menos 80% dos provetes	

em que:

- $R_L$  Resistência em tração longitudinal, [N]  
 $P$  Peso de 10 metros para os produtos em rolo ou 3 painéis, com a mesma espessura e largura que os provetes de ensaio, [N]  
 $D$  Deformação por peso próprio (afastamento, em suspensão, de 0,35 m do provete em relação a um plano de referência), [m]  
 $R_t$  Resistência por tração perpendicular às faces, [MPa]  
 $A_r$  Alongamento à rotura, [%]

#### 3.1.4.6. Permeabilidade ao vapor de água – E

Os materiais dos isolamentos térmicos podem ser classificados segundo cinco níveis através do seu valor de permeância ao vapor de água (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Níveis de Permeância ao vapor de água [19]

Nível	Permeância – $P_e = \frac{\pi}{e}$ [kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa)] <sup>(*)</sup>
<b>E<sub>1</sub></b>	$P_e > 6,25 \times 10^{-10}$
<b>E<sub>2</sub></b>	$1,25 \times 10^{-10} < P_e \leq 6,25 \times 10^{-10}$
<b>E<sub>3</sub></b>	$3,13 \times 10^{-11} < P_e \leq 1,25 \times 10^{-10}$
<b>E<sub>4</sub></b>	$2,08 \times 10^{-12} < P_e \leq 3,13 \times 10^{-11}$
<b>E<sub>5</sub></b>	$P_e \leq 2,08 \times 10^{-12}$
<sup>(*)</sup> 1 kg/(m <sup>2</sup> .s.Pa) = 4,800 x 10 <sup>8</sup> g/(m.h.mmHg)	

### 3.2. ISOLAMENTOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS

#### 3.2.1. INTRODUÇÃO

Neste subcapítulo serão apresentados alguns isolamentos térmicos convencionais, comumente utilizados em Portugal e preconizados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6- Isolamentos térmicos comumente utilizados em Portugal (adaptado de [19])

Designação	Estrutura	Produção					
		Painéis ou Placas	Mantas	Granel	Formado <i>in situ</i>	Blocos	Projetado ou Injetado
Isolamentos de natureza natural							
Lã de rocha	Fibrosa	x	x				x
Lã de vidro	Fibrosa	x	x				
Argila expandida	Celular	x		x		x	
Betão celular	Celular				x	x	
Betão com inertes leves de argila expandida	Mista				x		
Isolamentos de natureza vegetal							
Cortiça expandida	Celular	x		x			
Isolamentos de natureza sintética							
Poliestireno expandido moldado	Celular	x					
Poliestireno expandido extrudido	Celular	x					
Poliuretano	Celular	x			x		x

### 3.2.2. LÃ DE ROCHA

A lã de rocha provém de fibras minerais de rochas vulcânicas, como o basalto e o calcário, sendo um material incombustível que contribui para melhorar a resistência ao fogo dos elementos construtivos dos edifícios. Depois de aquecer as rochas basálticas e outros minerais a cerca de 1500°C, estes são transformados em filamentos que, misturados com resinas orgânicas, permitem a produção de produtos leves, flexíveis ou rígidos, consoante o grau de compactação [23,24].

Como anteriormente apresentado na Tabela 3.6, a lã de rocha é produzida em painéis e em mantas (Figura 3.1 e 3.2) sendo que se caracteriza por uma elevada estabilidade térmica e compressibilidade, mas fraca resistência ao corte. Relativamente ao seu comportamento face à água, a lã de rocha é permeável ao ar e ao vapor de água, mas é impermeável à água líquida [23].

A Agência Internacional de Pesquisa em Cancro, classifica este isolamento como cancerígeno para os humanos e, nesse sentido, não recomenda o contacto direto com este material, devendo ainda garantir-se na sua aplicação, que não há contacto com o ar interior do edifício [23].

A gama de valores de condutibilidade térmica encontra-se sintetizada na Tabela 3.7.



Figura 3.1- Lã de rocha em rolo [25]



Figura 3.2- Lã de rocha em painéis [26]

Tabela 3.7- Valores de condutibilidade térmica da lã de rocha [20]

Material	Massa volúmica aparente seca, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutibilidade térmica, valor de cálculo, $\lambda$ [W/m.°C]
Lã de Rocha	20-35	0,045
	35-100	0,040
	100-180	0,042

### 3.2.3. LÃ DE VIDRO

A lã de vidro é um material essencialmente composto de areia e restos de vidro reciclado por fusão, sendo produzido em painéis ou mantas (Figura 3.3 e 3.4). Apresenta alguma facilidade na aplicação devido à sua estrutura elástica e flexível. A reação ao fogo dá-se de forma passiva, uma vez que a lã de vidro é um material incombustível, evitando assim a propagação das chamas [23].

Face à água, o seu comportamento é aceitável a curto prazo, tendendo, a longo prazo, a perder capacidades térmicas, diminuindo assim o seu desempenho. A durabilidade da lã de vidro para um desempenho térmico ótimo é de dez anos. Depois desse período, a lã de vidro comprime-se e o seu desempenho é afetado [23]. Na Tabela 3.8 apresentam-se os valores de condutibilidade térmica para diferentes gamas de massa volúmica seca.



Figura 3.3- Lã de vidro em rolo [27]



Figura 3.4- Lã de vidro em painéis [28]

Tabela 3.8- Valores de condutibilidade térmica da lã de vidro [20]

Material	Massa volúmica aparente seca, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutibilidade térmica, valor de cálculo, $\lambda$ [W/m.°C]
Lã de Vidro	8-15	0,045
	15-100	0,040

#### 3.2.4. ARGILA EXPANDIDA

A argila expandida (Figura 3.5) é obtida através da cozedura de grânulos de argila crua a 1100°C em fornos rotativos. A sua forma de produção é a granel e permite gerar um bom isolamento térmico quando misturada com betão. No entanto, quando a argila expandida se encontra solta, considera-se um isolamento térmico de baixa qualidade pois, os grânulos sem ligante, não transferem facilmente energia entre eles [23].

Relativamente ao seu comportamento mecânico, a argila expandida oferece alta resistência à compressão, sendo recomendada a sua aplicação em terraços e caves. Além disso, é bastante resistente quando se encontra em contacto com água.

A sua massa volúmica aparente seca, varia de acordo com o tamanho das partículas [23]:

- Areia: 600-700 kg/m<sup>3</sup>
- 0 a 1 mm: 710-810 kg/m<sup>3</sup>
- 1 a 4 mm: 480-580 kg/m<sup>3</sup>
- 4 a 8 mm: 350-410 kg/m<sup>3</sup>
- 8 a 12 mm: 350-360 kg/m<sup>3</sup>
- 12 a 20 mm: 290-350 kg/m<sup>3</sup>

O valor de condutibilidade térmica definido para massas volúmicas inferiores a 400 kg/m<sup>3</sup> é 0,16 W/m.°C [20].



Figura 3.5- Argila expandida a granel [29]

#### 3.2.5. BETÃO CELULAR

O betão celular (Figura 3.6) é um produto homogéneo que se obtém mediante a mistura de água, cimento e um aditivo espumante que facilita a sua homogeneização. Este aditivo permite que as moléculas se dispersem na mistura água-cimento, favorecendo a formação de bolhas de ar no betão, conduzindo à formação do betão celular [30].

Devido à sua elevada concentração de bolhas de ar, o betão celular apresenta uma consistência fluída, facilitando a sua colocação em obra. Relativamente à sua densidade, esta pode variar entre 300 e 600 kg/m<sup>3</sup>, em função da relação da mistura entre o cimento e aditivo [30].

A sua estrutura celular favorece ainda as propriedades de isolamento do betão celular, permitindo valores de condutibilidade térmica que variam com a densidade conforme a Tabela 3.9.



Figura 3.6- Betão Celular formado *in situ* [31]

Tabela 3.9- Condutibilidade térmica do Betão Celular [30]

Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]
400	0,100
450	0,132
500	0,163

### 3.2.6. BETÃO COM INERTES LEVES DE ARGILA EXPANDIDA

Graças às suas características de resistência associadas à sua leveza, a argila expandida constitui o granulado ideal para a produção de betão leve estrutural, uma vez que permite reduzir consideravelmente o peso das estruturas e concede vantagens de natureza estrutural, geotécnica e térmica ao betão. Além disso, e como referido anteriormente, a argila expandida oferece alta resistência à compressão [32].

O uso do betão com inertes leves de argila expandida (Figura 3.7) é particularmente útil para reduzir perdas através de pontes térmicas, uma vez que não altera as técnicas de construção convencionais e evita que se utilizem elementos construtivos pesados para as corrigir [32].

Os valores de condutibilidade térmica do betão com inertes de argila expandida depende da sua massa volúmica aparente seca que pode variar de 1400 a 1800 kg/m<sup>3</sup> resultando em valores de  $\lambda$  entre 0,85 a 1,05 W/(m.°C) [20].

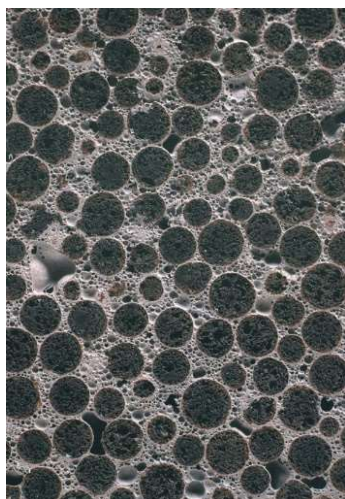


Figura 3.7- Betão com inertes de argila expandida [33,34]

### 3.2.7. CORTIÇA EXPANDIDA

A cortiça é um material de origem vegetal, extraído de sobreiros, característicos de regiões mediterrânicas. A matéria-prima, totalmente natural e renovável, é, primeiramente, reduzida a grânulos, que posteriormente, são expandidos a vapor (a cerca de 300°C) por autoclave. Ao expandirem, os grânulos aglomeram-se entre si através da resina que detêm [23].

A cortiça expandida constitui uma solução de elevado desempenho térmico, podendo ser obtida a granel ou em painéis (Figura 3.8 e 3.9). É especialmente indicada para aplicação em paredes exteriores e interiores, lajes, cobertura e piso radiante. Na função de isolamento térmico, o aglomerado expandido de cortiça auxilia na proteção contra as amplitudes térmicas, reduzindo perdas de energia e condensação superficial de humidade nas paredes e tetos [35]. O valor de condutibilidade térmica para o aglomerado de cortiça expandida é igual a 0,045 W/m.°C para uma gama de valores de massa volúmica aparente seca entre 90 e 140 kg/m<sup>3</sup> [20].



Figura 3.8- Grânulos de cortiça expandida [36]



Figura 3.9- Aglomerado de cortiça expandida [37]

### 3.2.8. POLIESTIRENO EXPANDIDO MOLDADO (EPS)

O poliestireno expandido moldado (Figura 3.10) é produzido a partir de petróleo em estado bruto sendo a matéria-prima deste material o poliestireno expansível, um polímero de estireno que contém um agente expensor. O seu processo de produção consiste em unir uma grande quantidade de pequenas bolas, através de compressão, durante uma moldagem que prenderá o ar ainda seco. O método de fabrico do poliestireno expandido é bastante poluente, e quando se encontra em contacto com o fogo, o material liberta gases tóxicos [23].

Este material possui uma boa capacidade de isolamento térmico, é permeável ao vapor de água e oferece uma alta resistência mecânica. O facto de ser um material muito leve permite o seu fácil manuseamento [23]. A gama de valores de condutibilidade térmica do EPS apresentam-se na Tabela 3.10.



Figura 3.10- Poliestireno expandido moldado [38]

Tabela 3.10- Valores de condutibilidade térmica para o EPS [20]

Massa volúmica aparente seca [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutibilidade térmica [W/(m.°C)]
13-15	0,042
15-20	0,040
>20	0,037

### 3.2.9. POLIESTIRENO EXPANDIDO EXTRUDIDO (XPS)

O poliestireno expandido extrudido (Figura 3.11) é obtido a partir de pequenas bolas de monómero de estireno misturadas e extrudidas com um produto expansivo [23].

A sua utilização é particularmente adequada para aplicações com alta resistência mecânica à compressão. Face à água, o seu comportamento é bom, uma vez que é permeável ao vapor de água, sendo apropriada a sua utilização em coberturas, terraços, pavimentos, etc.[23].

À semelhança do poliestireno expandido moldado, o seu modo de produção é bastante poluente e, quando em contacto com o fogo, produz gases tóxicos [23]. Para massas volúmicas entre 25 e 40 kg/m<sup>3</sup> o valor de condutibilidade térmica do XPS é 0,037 W/m.°C [20].



Figura 3.11- Poliestireno expandido extrudido [39]

#### 3.2.10. POLIURETANO

Como anteriormente foi exposto na Tabela 3.6, o poliuretano é um isolamento de origem sintética, pertencente à classe dos polímeros e é obtido a partir do di-isocianato de parafenileno e do etilenoglicol.

Este material é utilizado sob a forma de placas (Figura 3.12) ou entre paramentos metálicos (Figura 3.13), painéis sanduíche. Apresenta uma boa capacidade de isolamento, sendo impermeável ao vapor de água, não absorvendo água. Exibe ainda uma alta resistência à compressão. Em contacto com o fogo, o material liberta gases tóxicos [20,23].

Uma vez que o poliuretano não é reciclável, a sua aplicação conduz a uma solução não sustentável. No que respeita aos riscos de saúde decorrentes da sua utilização, estes são menores quando comparados com produtos como a lã de vidro e a lã de rocha [23].

Na Tabela 3.11 encontram-se descritos os valores de condutibilidade térmica para as diferentes formas de utilização.



Figura 3.12- Poliuretano em placa [40]



Figura 3.13- Painéis sanduíche [41]

Tabela 3.11- Valores de condutibilidade térmica da espuma rígida de poliuretano [20]

<b>Espuma rígida de poliuretano</b>	<b>Massa volúmica aparente seca [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Condutibilidade térmica [W/m.°C]</b>
Em placas	20-50	0,040
Projetado ou injetado	20-50	0,042
Entre paramentos metálicos (painéis sanduíche)	35-50	0,037

### 3.3. ISOLAMENTOS TÉRMICOS INOVADORES

#### 3.3.1. INTRODUÇÃO

Os isolamentos térmicos inovadores que serão apresentados, dividem-se essencialmente em dois grupos: o primeiro, destinado a apresentar isolamentos térmicos que representem desenvolvimentos inovadores, associados aos materiais de isolamento convencionais anteriormente apresentados, e o segundo grupo, onde se expõem alguns isolamentos térmicos com recurso a materiais inovadores.

#### 3.3.2. INOVAÇÃO DE MATERIAIS DE ISOLAMENTOS TÉRMICOS CONVENCIONAIS

##### 3.3.2.1. Lã de rocha projetada

O mercado é cada vez mais exigente face às necessidades térmicas dos materiais, e uma vez que a lã de rocha, pelas suas características físicas, é bastante utilizada, houve necessidade de inovar este material, permitindo que o mesmo chegue a locais de difícil acesso [42].

Em resposta a essas exigências, surge no mercado a lã de rocha projetada (Figura 3.14) ou injetada que pode ser aplicada em qualquer superfície ou espaço, sem necessitar de suportes e, quando aplicada com um acabamento apropriado, permite que este material ofereça excelentes características isoladoras, de fácil aplicação e que funcione como corta-fogo [42].



Figura 3.14- Lã de Rocha projetada [43]



### 3.3.2.2. Blocos de argila expandida

Convencionalmente, a argila expandida era utilizada solta, principalmente sobre coberturas. No entanto, ao compreender-se que a argila expandida, devido à sua leveza, poderia reduzir consideravelmente o peso de sobrecarga das estruturas e, dado que as suas propriedades térmicas contribuem para melhorar o conforto térmico, integrou-se no betão, tornando-o bastante mais leve. Deste modo, e dada a evolução dos sistemas produtivos, produziram-se blocos leves (Figura 3.15) e painéis pré-moldados leves de argila expandida.

Este novo produto permite reduzir o peso dos blocos de alvenaria até 30% e, além disso, incorpora propriedades termoacústicas. Muitas empresas, em Portugal, hoje em dia, dedicam-se ao fabrico destes blocos, oferecendo uma vasta gama de produtos, que compreendem simples blocos de alvenaria de argila expandida, até elementos que incorporam camadas de outros isolamentos térmicos, como é o caso do XPS (Figura 3.16) e que permitem melhorar, principalmente, o desempenho térmico e acústico e ainda reduzir o efeito das pontes térmicas [44-46].

Consoante os sistemas construtivos produzidos, existem diferentes tipos de blocos, cuja distribuição e dimensões, aliados ao tipo de betão utilizado, permitem reduzir coeficientes de transmissão térmica e oferecem uma elevada inércia térmica, o que numa transferência de energia, permite que não haja alterações bruscas de temperatura. Além disso, e devido às dezenas de micro caixas-de-ar, estes blocos apresentam uma elevada capacidade de respiração, o que evita a ocorrência de condensações internas [44].



Figura 3.15 – Bloco térmico de argila expandida  
[45]



Figura 3.16 – Forra térmica de argila expandida e XPS  
[46]

### 3.3.2.3. Blocos de betão celular autoclavado

O betão celular autoclavado pode ser pré-moldado em forma de bloco que, posteriormente, é curado sob uma pressão elevada, dentro de fornos especiais chamados autoclaves.

Os blocos de betão celular autoclavado (Figura 3.17) apresentam características e propriedade para a construção de alvenarias de alta qualidade, uma vez que são um isolamento térmico excelente com elevada resistência à compressão, incombustibilidade e resistência ao fogo. Além disso são bons isolamentos acústicos e são fáceis de trabalhar e manusear [47].

Apesar do bom desempenho térmico destes blocos, em Portugal, a construção com betão celular autoclavado não é comum. Além disso, não existem empresas portuguesas a fabricá-lo pelo que é um produto importado [47].



Figura 3.17 – Bloco de Betão Celular Autoclavado [48]

#### 3.3.2.4. EPS com grafite

O EPS com grafite (Figura 3.18), é um isolamento térmico que oferece melhorias no desempenho térmico, quando comparado ao EPS como isolamento térmico convencional, sendo o seu coeficiente de condutibilidade térmica igual a  $0,031 \text{ W/(m.}^{\circ}\text{C)}$  [49].

No isolamento EPS com grafite, as moléculas microscópicas de grafites estão contidas em 3% da sua composição e têm uma função refletora impedindo a transmissão de calor através de radiação. Deste modo, a convecção torna-se o principal mecanismo onde existem perdas de calor [50].

A matéria-prima que compõe este isolamento contém retardadores de chama, o que obriga a cortar as placas deste isolamento a partir de blocos que precisam de ser armazenadas por um período de 14 dias, a fim de completarem o processo de retração e oferecerem estabilidade dimensional [50].



Figura 3.18 – EPS com grafite em placas [51]

#### 3.3.2.5. Poliuretano projetado ou injetado

O poliuretano pertence à classe dos polímeros, sendo a sua matéria-prima o petróleo. O petróleo é formado por uma complexa mistura de compostos onde é possível, quando possuem diferentes temperaturas de ebulição, separá-los através de destilação ou craqueamento [52].

Obtém-se o poliuretano a partir do di-isocianato de parafenileno e do etilenoglicol. Para se obter a espuma, é expandido a quente por meio de injeção de gases. A dureza da espuma pode ser controlada conforme o uso que se lhe quer dar [52].

A inovação do poliuretano para espuma de poliuretano projetado ou injetado (Figura 3.19) veio alargar a sua aplicabilidade, uma vez que a sua utilização permite chegar a lugares onde as placas não chegam. O poliuretano projetado só deve ser aplicado por equipas especializadas e é pulverizado a alta pressão diretamente na superfície.



Figura 3.19- Poliuretano projetado e injetado [53,54]

### 3.3.3. ISOLAMENTOS TÉRMICOS COM MATERIAIS INOVADORES

#### 3.3.3.1. Aerogel de sílica

O aerogel é uma substância com uma densidade extremamente baixa, composta de sólidos nano estruturados, mesoporosos (partículas com diâmetros entre 2 e 50 nm), com propriedades de isolamento elevadas, que confinam o ar nos seus poros, permitindo obter uma condutibilidade térmica inferior à do ar parado [55].

A utilização deste material na construção contribui significativamente para melhorar o conforto térmico, uma vez que se utilizam mantas flexíveis como isolamento térmico, aerogel a granel para correções de patologias na construção ou ainda nos envidraçados com incorporação de aerogel. O facto de alguns destes materiais serem semitransparentes contribui para a penetração da radiação solar, reforçando o isolamento de envidraçados [56].

Devido à sua porosidade e variedade do tamanho dos nanoporos, o aerogel de sílica é um material que apresenta uma condutibilidade inferior à própria sílica sólida. Os gases também são capazes de transportar o calor através do aerogel, uma vez que o aerogel de sílica apresenta uma estrutura porosa “aberta” permitindo a passagem do gás através do material. A determinação da condutibilidade térmica pode revelar-se difícil, pois é necessário ter em conta vários parâmetros, tendo no entanto sido demonstrado que, à temperatura ambiente e a uma pressão de ar constante, esse valor será próximo de 0,02 W/m.°C [57].

A manta flexível do aerogel (Figura 3.20) combina o aerogel de sílica, incorporando-o em mantas de fibras flexíveis, permitindo obter um isolamento térmico melhorado e de fácil utilização e aplicação. Além disso, face à água, apresenta um ótimo comportamento, uma vez que o aerogel é uma substância hidrofóbica. Quando em contacto com o fogo, este material apresenta uma elevada resistência às extremas variações de temperatura, sendo ideal para aplicações de corta-fogo. A condutibilidade térmica deste material é da ordem dos 0,014 W/m.°C [58].





Figura 3.20- Manta flexível de aerogel [59]

### 3.3.3.2. Painel de isolamento a vácuo (VIP)

O material do núcleo dos painéis de isolamento a vácuo (Figura 3.21) pode ser um pó fino ou uma fibra onde o ar tenha sido removido a uma pressão de 0,2 a 3 mbar. O núcleo de um VIP tem a capacidade de resistir à pressão atmosférica do invólucro, sendo que na Europa, o núcleo mais utilizado é a sílica coloidal pirogênica [60].

Um VIP, com núcleo de sílica pirogênica, apresenta um valor de condutibilidade térmica,  $\lambda$ , de 0,004 W/(m.K), medidas no centro do painel. Importa referir que, caso o elemento onde é colocado o VIP, apresente pontes térmicas habitualmente localizadas nas arestas do mesmo, o valor de  $\lambda$  aumentará. A existência de pontes térmicas depende da espessura do VIP e dos materiais adjacentes à zona da costura do painel a vácuo, podendo ocorrer devido a uma espessura muito reduzida da barreira que envolve o núcleo, pela existência de uma pequena abertura de ar entre dois painéis adjacentes ou ainda por irregularidades de construção [60].

Estes painéis foram desenvolvidos para serem utilizados em frigoríficos, congeladores e caixas de transporte de frio, onde a área de isolamento é limitada. Com o intuito de procurar novos materiais que não contivessem CFC, cloro fluorcarboneto, nocivos para a camada do ozono, em meados de 1980, os painéis de isolamento a vácuo foram introduzidos em edifícios, onde o seu potencial é grande, embora tenha de ser considerado o seu envelhecimento precoce. Deste modo, é recomendado que o VIP seja integrado num sistema onde seja fácil a sua troca, pois apenas têm uma vida útil de cerca de 25-40 anos, que é um período ligeiramente inferior à vida útil dos edifícios (cerca de 50 anos) [58].



Figura 3.21 – Painel de isolamento a vácuo [61]

### 3.3.3.3. Proteção térmica refletora de baixa emissividade

Uma proteção térmica de baixa emissividade, também designada por barreira radiante, é constituída na sua parte central por camadas de diferentes naturezas: espuma macia ou feltro de origem animal, vegetal ou sintético, polietileno de bolhas, etc. [55].

O núcleo deste material é revestido por uma ou várias folhas de alumínio com alguns milímetros de espessura, montadas por colagem, soldagem ou cozedura. Existem duas grandes famílias de proteções térmicas refletoras [62]:

- Produtos com bolhas: película de polietileno de aprisionamento de bolhas de ar;
- Produtos multicamadas: espuma de plástico mole e material fibroso de multicamadas separadas por folhas refletantes intermédias.

Os isolamentos térmicos ou barreiras radiantes caracterizam-se por reduzirem a transferência de calor por radiação. Este elemento é composto por um material de baixa emissividade e de alta refletividade, permitindo reduzir os ganhos térmicos no verão e as perdas de calor no inverno. As proteções térmicas refletoras de baixa emissividade são comumente utilizadas em tetos e coberturas, embora também possam ser utilizadas em paredes e em pavimentos de laje maciça e aligeirada e a sua utilização implica que, pelo menos uma superfície refletora, esteja em contacto com um espaço de ar, de modo a conferir um bom desempenho térmico [63].

Este produto encontra-se maioritariamente sob a forma de rolos, que variam entre 5 ou 30 centímetros de espessura (Figura 3.22).

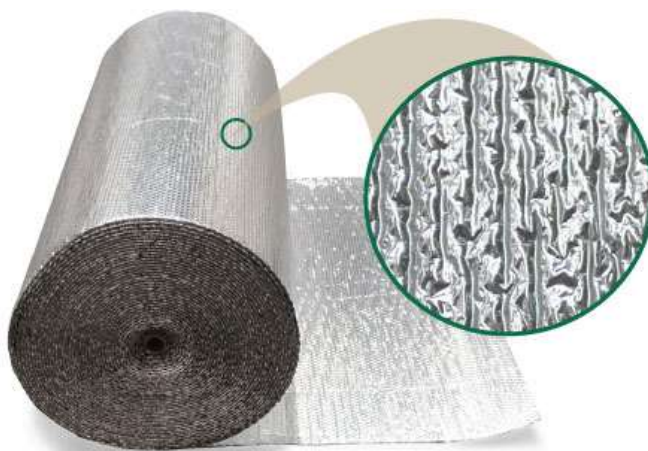


Figura 3.22- Proteção térmica refletora de baixa emissividade [64]

### 3.4. ISOLAMENTOS TÉRMICOS COM MATERIAIS SUSTENTÁVEIS

#### 3.4.1. IMPORTÂNCIA DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS SUSTENTÁVEIS

O conceito de sustentabilidade tem vindo a ganhar especial destaque nos dias de hoje, uma vez que atualmente, existe uma maior preocupação com a prevenção do meio ambiente, e consequentemente com a qualidade de vida do ser humano [65].

Neste sentido, e uma vez que a sustentabilidade tem repercussões em toda as atividades desenvolvidas pelo Homem, com especial relevância sobre a construção, importa conhecer a evolução deste conceito, desde as primeiras preocupações até à atualidade [65].

As primeiras preocupações relativas a esta temática, nomeadamente referentes aos direitos humanos e prevenção do meio ambiente, surgem na década de 70 do séc. XX. No entanto, em 1968, a formação do Clube de Roma, precedeu toda a corrente sociológica que permitiu discutir essas questões e principais medidas a tomar para assegurar a sua prevenção [65].

Em 1972, foi publicado um relatório, elaborado pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), intitulado “*Os limites do crescimento*”, onde foram abordados problemas cruciais para o desenvolvimento futuro da Humanidade, no âmbito da energia, poluição, saneamento, saúde, ambiente e crescimento populacional. De acordo com este relatório, concluiu-se que o planeta Terra não suportaria maior crescimento populacional tendo em conta os recursos naturais e o aumento da poluição, apesar de todos os avanços tecnológicos. Neste mesmo ano, é realizada em Estocolmo a 1ª Conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente e desenvolvimento, que levou à criação do programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (*UNEP- United Nations Environment Programme*), com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável do ambiente global e de coordenar as ações internacionais de proteção ao meio ambiente e desenvolvimento sustentável. Esta primeira grande cimeira das Nações Unidas marcou o início da consciência política e pública em relação ao problema ambiental global, tendo, a partir desse momento e até aos dias de hoje, ocorrido muitas conferências e debates, que deram origem aos principais documentos e programas que se constituem para definir e regulamentar o desenvolvimento sustentável [65,66].

Em 1983 foi criada a “*UN World Commission on Environment and Development*” para discutir o problema da deterioração do ambiente e dos recursos naturais, assim como das suas consequências em termos de desenvolvimento económico e social, que resultou, em 1987, no *Relatório Brundtland*, elaborado na Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU, presidida por Gro Harlem Brundtland [65,66]. Este relatório define o desenvolvimento sustentável como “*o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprimir as suas próprias necessidades*” [67] e aponta para a incompatibilidade entre desenvolvimento sustentável e os padrões de produção e consumo vigentes, apelando a uma conciliação entre crescimento económico e questões ambientais e sociais.

Uma vez que o modelo adotado pelos países industrializados, e reproduzido pelas nações em desenvolvimento, era amplamente criticado, foram criadas medidas preventivas baseadas na preservação ambiental e dos recursos naturais disponíveis na sociedade, de modo a reverter as projeções atuais de situações críticas no uso dos potenciais hídricos e energéticos e do destino dos resíduos sólidos por meio de um conjunto de estratégias e procedimentos. Numa lista de medidas a serem tomadas, constam a diminuição do consumo de energia, o desenvolvimento de tecnologias para uso de fontes energéticas renováveis e a evolução da produção industrial nos países não industrializados com base em tecnologias ecologicamente adaptadas [65].

Com o objetivo de continuar a estabelecer princípios internacionais e nacionais de desenvolvimento sustentável, em 1992, durante a Conferência das Nações Unidas sobre o meio ambiente e desenvolvimento “eCO-92”, realizada no Rio de Janeiro, Brasil, foi elaborado um documento designado *Agenda 21* que sistematiza um plano de ações com o objetivo de alcançar o desenvolvimento sustentável no século XXI, estabelecendo as valências que cada país deve considerar, global, nacional e localmente, de modo a solucionar problemas socioambientais [65,66].

O Protocolo de Quioto, adotado em 1997, tendo apenas entrado em vigor em 2005, é o primeiro documento onde são definidas pela primeira vez metas de redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), responsáveis pelo aquecimento global do planeta, com um período de aplicação de 2008 a 2012 [66].

Devido a estas questões e princípios relacionados com o desenvolvimento sustentável, interessa avaliar dentro dos vários setores, aqueles que mais contribuem para a degradação do meio ambiente e, portanto, que mais poluem.

Segundo o Eurostat, EPRS, European Commission, em 2014, a União Europeia (UE) produziu 2,5 bilhões de toneladas de resíduos distribuídos conforme a Figura 3.23 [68].



Figura 3.23- Resíduos por setor na União Europeia (adaptado de [68])

Relativamente aos resíduos urbanos, as metas da UE para a reutilização e reciclagem de resíduos domésticos para 2025 situam-se acima de 55% e as metas para os resíduos urbano depositados em aterro até 2035 situam-se abaixo de 10%. Em Portugal, no ano 2016, foram produzidos 453 kg/capita de resíduos urbanos, sendo que 30% dos resíduos foram para a reciclagem ou compostagem e 49% foram depositados em aterro [68].

Através da análise da Figura 3.23, verifica-se que o setor da construção tem, por isso, uma importância significativa para alcançar as metas de desenvolvimento sustentável estabelecidas, uma vez que as atividades de construção, utilização, manutenção e demolição, entre outras, consomem recursos e geram resíduos, em elevadas quantidades quando comparadas com outras atividades. A indústria da construção implica o consumo de variados recursos: materiais (50% dos recursos mundiais destinam-se à construção), água (40% da água utilizada no mundo destina-se a abastecer instalações sanitárias e outros usos dos edifícios), terra (60% da terra cultivável é utilizada para a construção) e madeira (70% dos produtos que utilizam madeiras ou os seus derivados são para construção) [65,69].

Neste contexto, interessa introduzir o conceito de construção sustentável, que deriva do conceito de desenvolvimento sustentável e que analogamente ao seu conceito base, visa adotar uma estratégia ambiental direcionada à produção de construções adaptadas ao meio ambiente e às exigências dos seus utilizadores, pensando nas gerações futuras.

A definição de construção sustentável, mais consensual e utilizada recentemente, foi proferida por Charles Kibert, em 1994, no âmbito do Conselho Internacional da Construção (CIB – International Council of Research and Innovation in Building and Construction):

*“A Construção Sustentável tem como objetivo a criação e manutenção responsáveis de um ambiente construído saudável, baseado na utilização eficiente de recursos e em princípios ecológicos”* (Charles Kibert, 1994)

Com base nesta definição, o CIB apresentou os “sete princípios para a construção sustentável” indicados de seguida [70,71]:

- 1) Reduzir o consumo de recursos – Redução
- 2) Reutilizar recursos – Reutilização
- 3) Utilizar recursos recicláveis – Reciclagem
- 4) Proteger a natureza – Proteção Ambiental
- 5) Eliminar produtos tóxicos – Eliminação da toxicidade
- 6) Analisar os custos de ciclo de vida – Económico
- 7) Assegurar a qualidade – Qualidade

Neste enquadramento, urge evitar os desperdícios de materiais ou tratá-los com o intuito de reduzir o seu impacto no meio ambiente. Deste modo, a UE legislou sobre os objetivos e metas para melhorar a gestão de resíduos, estimular a reciclagem, limitar o uso de aterros sanitários, criando incentivos para mudar o comportamento do consumidor. Se se produzir, reutilizar e reciclar um produto, e se os desperdícios de uma indústria se tornarem a matéria-prima de outra, é possível mudar para uma economia mais circular, onde os resíduos são eliminados e os recursos são utilizados de maneira eficiente e sustentável [68,72].

Uma melhor gestão dos resíduos permite ainda reduzir problemas de saúde e ambientais, reduzir emissões de gases de efeito de estufa (ligados diretamente às emissões produzidas por aterros e indiretamente, através da reciclagem dos materiais) e evitar os impactos negativos a nível local, devido à deterioração dos aterros, poluição da água e ar e produção de lixo [72].

Um dos setores onde se consegue aproveitar materiais de desperdício com mais facilidade, devido ao facto de serem materiais inorgânicos, é o setor industrial. Henry Ford e outros líderes da indústria, entenderam que a produção em massa significa consumo em massa, o que leva ao maior consumo dos recursos e consequentemente ao aumento do desperdício industrial, que afeta drasticamente o ecossistema e a sustentabilidade do planeta. Neste sentido, é importante alterar a forma como os resíduos são geridos [73].

Por ano, toneladas de resíduos industriais são acumulados e destruídos, sem que lhes seja dado um aproveitamento diferente. O seu destino final passa muitas vezes pelo depósito em aterro, que embora seja a solução mais praticada, é a última solução na hierarquia dos resíduos. Neste sentido, e face às metas estabelecidas, torna-se cada vez mais importante agir, procurando soluções para a reciclagem dos resíduos industriais ou para o reaproveitamento de peças sobrantes que possam ter utilidade e que não se fique apenas pela investigação laboratorial [74]. Já é possível verificar alguma evolução no que toca ao reaproveitamento de desperdício industrial, uma vez que algumas indústrias começam a ter consciência e a inteirar-se do conceito sustentável, procurando encontrar soluções para reaproveitar os seus próprios desperdícios. No entanto, infelizmente, a maioria destas indústrias fá-lo apenas quando lhes é assegurado algum retorno monetário.

Uma das indústrias com mais impacto em Portugal é indústria do calçado que produz, atualmente, cerca de 80 milhões de pares de sapatos por ano, dos quais 90% são exportados. Em consequência, cerca de 80 a 100 toneladas de resíduos industriais são encaminhados todos os dias para aterro. Se pensarmos que cada pessoa consome em média cerca de dois a quatro pares por ano, os quais em dado momento são descartados, pode também imaginar-se o acréscimo da quantidade de resíduos que também vão parar aos aterros. É indispensável que se analisem e implementem metodologias que promovam a valorização dos desperdícios, ao invés de os encaminhar de forma pouco correta. [74].

A quantidade de desperdícios produzidos pode e deve ser minimizada antes da produção do produto e não representar apenas uma preocupação quando é necessário fazer sua gestão. Um dos exemplos onde essa preocupação é tida antes da produção é por exemplo no corte de solas como se mostra na Figura 3.24.

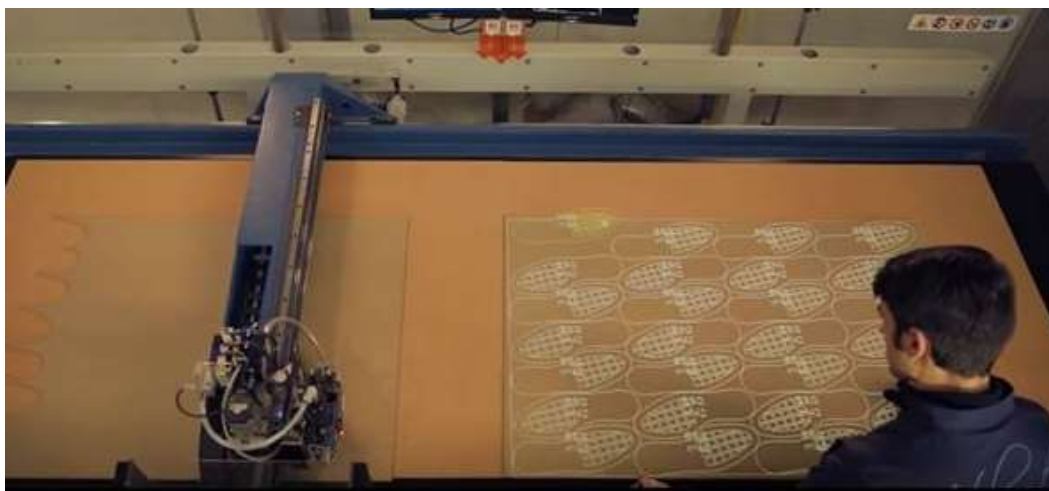


Figura 3.24- Corte de solas a laser na empresa Atlanta [75]

É de realçar ainda que, hoje em dia, várias medidas têm sido tomadas no sentido de promover a reciclagem e aproveitamento de resíduos urbanos e industriais e a não colocação dos mesmos em aterros. A economia circular tem sustentado novos padrões na política de resíduos e além disso, as regulamentações ambientais, o custo dos materiais e a escassez dos mesmos tem contribuído para a consciencialização dos benefícios do *ecodesign* e da construção sustentável em reciclar materiais em fim de vida, noutros materiais. Apesar de o pensamento da economia circular provar que sistemas de circuito fechados podem providenciar maiores benefícios sociais e ambientais, quando limitados a sistemas de gestão caracterizados por cadeias de abastecimento ascendentes, podem apresentar também vantagens numa gestão de desperdícios [76].

### 3.4.2. ESTUDO DE DESEMPENHO TÉRMICO COM MATERIAIS DE DESPERDÍCIO

A introdução do conceito de sustentabilidade no processo de projeto de edifícios incentivou várias pesquisas voltadas para o desenvolvimento de materiais de isolamento térmico utilizando materiais naturais, de desperdício ou reciclados. Alguns deles já são comercializados, enquanto outros ainda estão numa fase inicial de produção ou em estudo. Esta abordagem pode ser particularmente importante e útil em países em desenvolvimento, uma vez que estes não possuem políticas de reciclagem bem definidas e são afetados por questões relativas à eliminação de grandes quantidades de produtos agrícolas e industriais [77].

No entanto, as ações destinadas a reduzir os impactos ambientais do setor da construção não devem ser abordados apenas no sentido de melhorar as propriedades de isolamento térmicos dos edifícios, mas também melhorar a otimização de energia a nível urbano, através da integração de sistemas de aquecimento à distância ou sistemas tecnológicos de alta eficiência energética. Importa referir que a pesquisa se focou em explorar materiais inorgânicos, com especial atenção a desperdícios industriais, uma vez que, deste modo, os impactos relativos ao destino final dos mesmos, seriam diminuídos [77].

As propriedades de isolamento térmicos de diferentes materiais sustentáveis e de desperdícios agrícolas e industriais têm sido estudadas por vários autores com o objetivo de avaliar a oportunidade de os integrar no setor da construção. No entanto, muitos desses estudos ficam limitados a uma fase experimental e de laboratório [77].

#### **Fibras de vidro**

Vários estudos provaram que os desperdícios de vidro podem ser reciclados para realizar materiais de isolamento térmico e acústico, utilizando processos de formação e espuma. Ayadi et al. produziu um material denso de  $450 \text{ kg/m}^3$ , que consistia numa placa onde espuma de vidro era colocada entre duas finas camadas de fibras de vidro, tendo obtido um valor de condutibilidade térmica igual a  $0,031 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  [78]. Alguns produtos que utilizam fibras de vidro são hoje comercializados com valores de condutibilidade térmica entre  $0,038$  e  $0,050 \text{ W/m.K}$  e densidade entre  $100$  a  $165 \text{ kg/m}^3$  [79,80].

#### **Desperdícios de plástico**

As capacidades térmicas do tereftalato de polietileno (PET) comumente utilizado na indústria de embalagens e na produção de garrafas, têm sido estudadas com vista a encontrar novas estratégias para reciclar este material, permitindo reduzir o consumo de petróleo, e acima de tudo, diminuir os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado do mesmo. Garrafas de PET (75%) e PET no seu estado virgem (25%) foram usadas para produzir painéis de isolamento térmico em [81] tendo sido obtido um baixo valor de condutibilidade térmica,  $0,0355 \text{ W/mK}$ , para um material denso de  $30 \text{ kg/m}^3$ . Existem, atualmente, produtos comercializados à base de PET com valores de condutibilidade térmica de  $0,036$  a  $0,038 \text{ W/mK}$  para uma densidade de  $50 \text{ kg/m}^3$  [82,83].

## Desperdícios têxteis

Os desperdícios têxteis integram um conjunto de materiais reutilizáveis que podem ser incluídos na construção, uma vez que possuem diferentes possibilidades de aplicação. Estes desperdícios podem ter origem na industrial têxtil, ou serem o resultado de roupas que deixam de ser utilizadas.

O estudo do desempenho térmico destes desperdícios deve ser parcialmente baseado no comportamento dos tecidos quando são utilizados como roupa, uma vez que os mesmos têm como principal função proteger o corpo humano das diferentes temperaturas, a fim de manter as condições de conforto térmico. Neste sentido, foram realizados vários estudos com o objetivo de avaliar as propriedades térmicas dos tecidos e a sua aplicabilidade para proteger o edifício através de isolamentos térmicos, ficando demonstrado que as suas propriedades de isolamento térmico estão relacionadas com as propriedades e configuração dos seus componentes, nomeadamente, a estrutura capilar, as características dos fios e a distribuição do volume de ar nos tecidos [84-86]. Desta forma, o conhecimento do desempenho térmico, mecânico e físico dos vários tecidos e dos seus eventuais resíduos é essencial para otimizar o seu uso como matéria-prima na construção [87].

Valverde et al. realizou um material produzido através de sobras de têxteis sintéticos, constituídas por poliéster e poliuretano, tendo obtido valores de condutibilidade térmica entre 0,041 e 0,053 W/m.°C, correspondendo o valor mais baixo a uma densidade de 396 kg/m<sup>3</sup> [88]. Outro estudo relativo a dois diferentes tipos de desperdícios têxteis acrílicos, WFW, correspondente a desperdício têxtil (Figura 3.25) e WFS, correspondente a um resíduo de tecido (Figura 3.26) foi elaborado para estudar a sua aplicabilidade como material de construção para isolamento térmico, sendo que o material com melhor desempenho, WFW, foi caracterizado por uma condutibilidade térmica de 0,044 W/m.°C para uma densidade 440 kg/m<sup>3</sup> [87].



Figura 3.25- WFW (Woven fabric waste) [87]



Figura 3.26- WFS (Woven fabric subwaste) [87]

Em [89] foram ainda investigados painéis inovadores compostos por desperdício de cartão e desperdício de fibras têxteis unidas por cola, N7 e N15, onde apenas a espessura da camada do meio variava (desperdício de fibra têxtil) de 7 mm para 15 mm, respetivamente. O coeficiente de condutibilidade térmica encontrado para as amostras testadas foi 0,034 W/m.K para N7 e 0,039 W/m.K para N15.

Alguns fabricantes que trabalham no setor da construção civil começaram a entender o potencial dos materiais têxteis reciclados e começaram a produzir painéis de isolamento térmico, com condutibilidade térmica de 0,0358 W/mK para uma densidade de 80 kg/m<sup>3</sup> [90]. Existem ainda isolamentos térmicos utilizando algodão reciclado, comercializados e provenientes da reciclagem de fibras de ganga, com valor de condutibilidade térmica de 0,039 W/m.°C com uma densidade de 20/25 kg/m<sup>3</sup> (Figura 3.27) [91].





Figura 3.27 – Painéis feitos de algodão (esquerda) e de ganga (direita) reciclados [77]

### Fibra de celulose

As fibras naturais têm recebido especial atenção, pois devido à sua estrutura interna, geralmente garantem alta porosidade. Entre essas fibras, a celulose é o biopolímero mais representativo e amplamente utilizado na produção de papel e cartão. Neste sentido, diferentes materiais de isolamento térmico foram desenvolvidos recentemente [92].

Asdrubali et al. estudou o desempenho térmico e acústico de painéis de cartão ondulado da indústria de embalagem, dando particular relevância à medição das perdas de transmissão e à condutibilidade térmica. Os resultados obtidos demonstram que os painéis de cartão apresentam um desempenho promissor em termos acústicos, embora o desempenho de isolamento térmico fique ligeiramente abaixo dos isolamentos térmicos comumente utilizados [92].

Um material de isolamento térmico, com propriedades de absorção sonora, feito de jornais e revistas de desperdício, foi desenvolvido em [93] tendo sido obtido um valor de condutibilidade térmica de  $0,039 \text{ W/m.K}$  para uma densidade de  $55 \text{ kg/m}^3$  [93].

Hoje em dia, já se comercializam materiais de isolamento térmico de fibra de celulose. Um deles é fabricado através de um processo otimizado de reciclagem de papel de jornal. Trata-se de um produto não tóxico, caracterizado por um coeficiente de condutibilidade térmica de  $0,040 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$  e a sua aplicação pode realizar-se através de projeção, insuflação ou isolamento em manta [94]. Existe ainda outro produto, também ele fabricado à base de jornais reciclados e de aditivos naturais que apresenta o mesmo valor de condutibilidade térmica podendo ser aplicado através de insuflação, injeção ou projeção (Figura 3.28) [95].

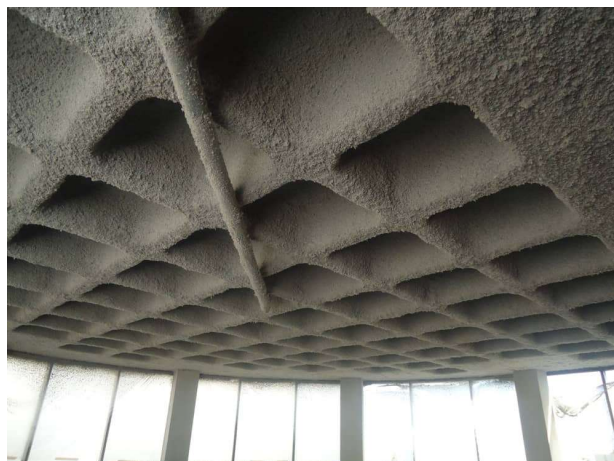


Figura 3.28- Fibra de celulose projetada [95]

## Outros

Existem variados estudos relativos a materiais onde se pretende demonstrar a propriedades térmicas e aplicabilidade como isolamento térmico de materiais diversos. Vasilache et al. realizou um estudo com materiais como a serradura, resto de poliestireno expandido e papel cortado a granel e obteve valores de condutibilidade térmica médios de 0,0485 W/m.K e 0,06599 W/m.K para o poliestireno expandido e para o papel cortado, respetivamente, tendo os valores de serradura variado num intervalo de 0,0441 a 0,0712 W/m.K [96].

## 3.5. RESUMO DO CAPÍTULO

O capítulo 3, relativo a isolamentos térmicos, inicia-se com a apresentação da seleção exigencial de isolamentos térmicos, uma vez que estes têm como função principal o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício, de modo a reduzir as trocas de calor entre o exterior e o interior, reduzindo desta forma as necessidades de aquecimento e arrefecimentos dos edifícios e o risco do aparecimento de condensações.

Na seleção exigencial de isolamentos térmicos, primeiramente, os isolamentos térmicos são classificados de acordo com:

### a) Produção:

- Isolamentos pré-fabricados: placas/painéis, mantas, blocos;
- Isolamentos formados *in situ*: granel, moldados, injetados/projetados.

### b) Estrutura:

- Materiais celulares (ex. aglomerado de cortiça);
- Materiais fibrosos (ex. lã de rocha);
- Materiais granulares (ex. granulados de cortiça soltos).

c) Apresentação:

- Materiais rígidos;
- Materiais semirrígidos;
- Materiais granulares/pulverulentos;
- Materiais pastosos.

d) Natureza das matérias-primas:

- Mineral;
- Vegetal;
- Sintética.

Posteriormente, são apresentadas as características inerentes aos isolamentos térmicos, sendo a condutibilidade térmica, a propriedade térmica mais importante dos isolamentos. Esta condutibilidade depende de fatores como a porosidade, dimensão dos poros, diâmetro das fibras, caráter isotrópico/anisotrópico, envelhecimento e tipo de gás que o material encerra.

De modo a caracterizar o desempenho de um isolamento térmico, é importante conhecer ainda o seu comportamento face à água, a sua permeabilidade ao vapor de água, o seu comportamento face aos agentes atmosféricos e biológicos, o seu comportamento face ao fogo, o seu comportamento mecânico, a sua estabilidade dimensional, o seu impacto face ao Homem e meio ambiente, a compatibilidade química, física, biológica ou mecânica, quando o isolamento se encontra ligado a outros materiais, e ainda outras características entre as quais, tempo de vida útil, conformidade com a regulamentação técnica, custo de aquisição, entre outros.

Posto isto, após a sua classificação e caracterização, é possível proceder à seleção exigencial dos isolamentos, através da certificação dos mesmos. A certificação preconizada apresenta dois graus de certificação:

- Certificação tipo “A”: define a resistência térmica, R, do elemento e garante os níveis mínimos,  $I_1$ ,  $S_1$ ,  $O_1$ ,  $L_1$ ,  $E_1$ , de aptidão de utilização;
- Certificação tipo “B”: define a resistência térmica, R, e os níveis de aptidão de utilização (ISOLE)

As exigências constantes da certificação são:

- R- Resistência térmica
- I- Compressibilidade
- S- Estabilidade dimensional
- O- Comportamento à água
- L- Comportamento mecânico
- E- Permeabilidade ao vapor de água

Para cada exigência, são apresentados níveis de aptidão de utilização que se encontram expostos nas Tabelas 3.1 a 3.5. De realçar que um material só pertence a determinado nível, se satisfizer todas as exigências dos níveis inferiores.

Após a seleção exigencial de isolamentos térmicos, são apresentados isolamentos térmicos convencionais, comumente utilizados em Portugal, onde são referidas algumas características, modos de produção e sua aplicabilidade, estando resumidas algumas das suas características e classificações mais relevantes na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Isolamentos térmicos convencionais

Material	Massa volúmica aparente seca, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ] [20,30]	Condutibilidade térmica, valor de cálculo, $\lambda$ [W/m.°C][20]	Fator de Resistência à Difusão do Vapor de Água, $\mu$ [21]	Coefficiente de Permeabilidade ao Vapor de Água, $\pi$ [kg/(m.s.Pa)] [21]
<b>Lã de Rocha</b>	20-35	0,045	1,1 a 1,3	140 a 170 x 10 <sup>-12</sup>
	35-100	0,040		
	100-180	0,042		
<b>Lã de Vidro</b>	8-15	0,045	1,1 a 1,5	125 a 170 x 10 <sup>-12</sup>
	15-100	0,040		
<b>Grânulos de argila expandida solta</b>	<400	0,16	3	48 x 10 <sup>-12</sup>
<b>Betão Celular</b>	400	0,100	3 a 12	15 a 61 x 10 <sup>-12</sup>
	450	0,132		
	500	0,163		
<b>Betão com inertes leves de argila expandida</b>	1400-1600	0,85	3,0 a 92	2,0 a 62 x 10 <sup>-12</sup>
	1600-1800	1,05		
<b>Aglomerado de cortiça expandida</b>	90-140	0,045	4,5 a 62	3,0 a 41 x 10 <sup>-12</sup>
<b>Grânulos de cortiça expandida</b>	20-100	0,060	3	62 x 10 <sup>-12</sup>
<b>Polistireno expandido moldado</b>	<11	0,055	19 a 150	1,2 a 10 x 10 <sup>-12</sup>
	11-13	0,045		
	13-15	0,042		
	15-20	0,040		
	>20	0,037		

<b>Poliestireno expandido extrudido</b>	25-40	0,037	80 a 300	$0,6 \text{ a } 2,3 \times 10^{-12}$
<b>Espuma rígida de poliuretano</b> em placas projetado ou injetado in situ entre paramentos metálicos (painéis sanduíche)	20-50 20-50 35-50	0,040 0,042 0,037	13 a 320	$0,58 \text{ a } 14 \times 10^{-12}$
<b>Betão Celular Autoclavado</b>	450 550 650 750	0,16 0,19 0,23 0,27		$695 \times 10^{-12}$

Após a apresentação dos isolamentos térmicos convencionais referem-se alguns isolamentos térmicos inovadores, quer em relação a inovações associadas a materiais convencionais, quer através de novos materiais.

Por fim, expõe-se a importância da utilização de materiais sustentáveis em isolamentos térmicos, fazendo em primeiro lugar, um enquadramento do conceito sustentabilidade e a sua evolução histórica, referindo depois o conceito de construção sustentável e abordando a problemática dos desperdícios de materiais. Posto isto, apresentam-se alguns estudos realizados sobre o desempenho térmico de materiais de desperdício, entre os quais, fibras de vidro, desperdícios de plástico e têxteis e fibra de celulose. Na Tabela 3.13, resumem-se os valores obtidos nos diversos estudos para a condutibilidade térmica dos materiais e respetiva densidade.

Tabela 3.13- Isolamentos térmicos com materiais sustentáveis

<b>Materiais de desperdício</b>	<b>Densidade [kg/m³]</b>	<b>Condutibilidade térmica [W/mK]</b>	<b>Referências</b>
<b>Vidro</b>	450	0,031	[78]
<b>Vidro (comercializado)</b>	100-165	0,038 – 0,050	[79,80]
<b>PET</b>	30	0,0355	[81]

<b>PET (comercializado)</b>	50	0,036-0,038	[82,83]
<b>Têxtil sintético (poliéster e poliuretano)</b>	396	0,041	[88]
<b>Têxtil acrílico</b>	440	0,044	[87]
<b>Cartão e fibras têxteis</b>	433	0,034-0,039	[89]
<b>Têxtil (comercializado)</b>	30-80	0,0358-0,042	[90]
<b>Ganga (comercializado)</b>	25-25	0,039	[91]
<b>Jornais e revistas</b>	55	0,039	[93]
<b>Fibra de celulose (comercializado)</b>		0,040	[94,95]

# 4

## EDIFÍCIOS ESCOLARES

### 4.1. ESCOLAS PRIMÁRIAS DO PLANO DOS CENTENÁRIOS

O Plano dos Centenários constituiu um projeto de construção de escolas em larga escala, levado a cabo pelo Estado Novo<sup>5</sup> em Portugal, entre 1941 e 1974, devendo o seu nome ao terceiro centenário da Restauração da Independência e ao oitavo centenário da Independência de Portugal, comemorados, respetivamente, entre 1940 e 1943. A elaboração do Plano foi atribuída a uma Comissão Central, que funcionava junto da Direção-Geral do Ensino Primário do Ministério da Educação Nacional, com vários representantes dos Ministérios do Interior, das Obras Públicas e Comunicações, com a colaboração dos diversos presidentes de câmaras municipais, diretores escolares dos distritos e delegados escolares dos concelhos. A construção das escolas ficou a cargo da Direção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais do Ministério das Obras Públicas, tendo Duarte Pacheco, então ministro, decidido iniciar rapidamente a construção de 200 edifícios escolares em todo o país [98,99].

Pretendia-se com este Plano proceder à organização e à instalação de todos os edifícios de ensino primário permitindo que todas as crianças tivessem uma escola perto da sua residência, numa tentativa de reduzir o analfabetismo em Portugal [98,99].

Para as primeiras escolas do Plano dos Centenários, os projetos-tipo escolhidos foram os mesmos aplicados em 1935 denominados “Projetos Regionalizados” de Rogério Azevedo e Raul Lino. Para a região Norte e Centro do país, o projeto-tipo aprovado foi elaborado pelo arquiteto Rogério de Azevedo e consistia em seis tipos regionais: Minho (tijolo), Alto Minho (granito), Douro (granito), Beira Alta (granito), Beira Litoral (cantarias) e Trás-os-Montes (xisto). Relativamente à zona Sul do país, o projeto elaborado foi o do arquiteto Raúl Lino e abrangia a região do Algarve (cantaria), Estremadura, Alentejo e Ribatejo (tijolo) [98].

Os edifícios do Plano dos Centenários, além de adotarem os dois projetos anteriormente descritos, procuravam tornar efetiva a separação por sexos: recreios divididos para meninas e meninos, entradas diferentes e salas também separadas por alas ou por pisos, segundo o número de salas [99,100].

A revisão dos projetos elaborados ficou a cargo dos arquitetos Manuel Fernandes de Sá, Joaquim Areal, Eduardo Moreira dos Santos e Alberto Braga de Souza. Uma vez que seriam construídas escolas em quantidade, foi necessário proceder a alterações, de modo a baixar o orçamento das mesmas, pelo que, os projetos finais seguiram as seguintes configurações [98]:

---

<sup>5</sup> Designa-se por “Estado Novo” o regime político que vigorou em Portugal entre 1933 e 1974, tendo como chefe de governo António de Oliveira Salazar e posteriormente, Marcello Caetano, sendo um regime autoritário, em que o poder legislativo, executivo e judicial se concentrava no chefe de governo [97].

- **Edifícios de uma sala – um sexo** (Figura 4.1) - Átrio, sala de aula, recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias;
- **Edifícios de duas salas – um sexo** (Figura 4.2) – Átrio, duas salas de aula, recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias. Os recreios cobertos eram separados através de instalações sanitárias existindo ainda, entre ambos, um espaço de arrumos.
- **Edifícios de duas salas – dois sexos** (Figura 4.3) – Dois blocos geminados tendo cada um: átrio; sala de aula e recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias. Os recreios cobertos eram separados através de instalações sanitárias existindo ainda, entre ambos, um espaço de arrumos.
- **Edifícios de três salas – um sexo** (Figura 4.4) – Rés-do-chão composto por átrio com corpo de escadas de acesso ao piso superior, duas salas de aula, recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias. O primeiro andar era composto por átrio com corpo de escadas e uma sala de aula.
- **Edifícios de quatro salas – um sexo** (Figura 4.5) – Rés-do-chão composto por átrio com corpo de escadas de acesso ao piso superior, duas salas de aula, recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias. O primeiro andar era composto por átrio com corpo de escadas e duas salas de aula.
- **Edifícios de quatro salas – dois sexos** (Figura 4.6) – Dois blocos geminados de dois pisos, tendo cada um: rés-do-chão com átrio e corpo de escadas de acesso ao piso superior, sala de aula, recreio coberto posterior com bloco de instalações sanitárias. No primeiro andar um átrio com corpo de escadas e sala de aula. Os recreios cobertos eram separados através de instalações sanitárias existindo ainda, entre ambos, um espaço de arrumos.

Em cidades e em vilas onde a concentração de crianças em idade escolar fosse significativamente superior, foram construídos edifícios de 6 e 8 salas.



Figura 4.1- Escola de Milhões, Bragança – tipo Xisto (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971)



Figura 4.2 – Escola masculina de Terroso, São Salvador, Póvoa de Varzim, Porto – tipo Douro Granito (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971)





Figura 4.3 – Escola de Ordem, Marinha Grande, Leiria – Edifício gémeo – tipo Estremadura (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar)



Figura 4.4 – Escola de Rua, Arrifana, Feira, Aveiro – tipo Minho Granito (Arquivo Delegação para as Obras de Construção de Escolas Primárias)



Figura 4.5 – Escola masculina n.º 3 de Vila do Conde, Porto- tipo Douro Granito (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1971)



Figura 4.6- Escola de Fontes, Santa Marta de Penaguião, Vila Real – Edifício gémeo – tipo Xisto (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar, 1972)

Relativamente à escolha dos terrenos onde foram edificadas as escolas primárias, as principais regras foram [100]:

- Terem uma orientação entre Este (Nascente) e Sul, com preferência para a banda de Este;
- Terem uma frente do terreno adequada às dimensões das fachadas principais dos edifícios;
- Serem locais planos de modo a facilitar a construção;
- Terem pontos de água ou serem facilmente abastecíveis;
- Servirem corretamente o núcleo que o Plano dos Centenários determinava para a escola.

A primeira fase do Plano dos Centenários iniciou-se com a construção de 561 escolas, num total de 1260 salas de aulas, distribuídas pelo país.

Alguns dos critérios invocados para justificar a necessidade da construção de novas escolas eram [98]:

- Mau estado das instalações escolares já existentes;
- Elevado número de crianças inscritas para a frequência escolar;
- Facilidade de aquisição de terrenos;
- Ofertas locais de materiais de construção;
- Falta de salas para a separação de sexos.

Durante o período de construção, foram efetuados ajustes, de modo a corrigir deficiências de funcionamento e conforto mantendo o cumprimento dos orçamentos aprovados pelo Estado. No final de 1955, foram efetuados novos estudos para a construção de edifícios escolares de uma e de duas salas, tendo no ano de 1956 sido elaborado um anteprojeto que consistia em duas soluções denominadas solução tipo Urbano (Figura 4.7), utilizada em aglomerados urbanos, com um certo desenvolvimento económico e a solução tipo Rural (Figura 4.8), para localidades rurais e pouco desenvolvidas. Nestes novos projetos, as escolas tinham que obedecer a alguns critérios, nomeadamente [100]:

- Uniformização das dimensões dos compartimentos: salas de aula, vestiários, blocos sanitários;
- Uniformização das dimensões dos vãos;
- Simplificação das coberturas, passando a duas águas em vez de quatro águas;
- Eliminação dos fogões de sala que, quando necessário, pudessem ser substituídos na sua função por salamandras;
- Redução de cantarias cujo emprego se limitaria a peitoris, degraus e soleiras;
- Redução da espessura das paredes.

Os edifícios do tipo Urbano caracterizam-se por apresentar uma ou duas salas de 8,0 x 6,0 m, com um pé-direito de 3,5 m, um vestiário dimensionado de forma a nele se poder desenvolver uma escada, caso o edifício viesse a ter mais um andar, um recreio coberto com alpendre, blocos sanitários e uma arrecadação. Os edifícios do tipo Rural eram compostos por uma sala de 8,0 x 6,0 m, com 3,5 m de pé-direito, um anexo com dois compartimentos sanitários e um pequeno abrigo coberto na zona de entrada [100].

Em 1961, com novas reformulações, começou-se a construir os primeiros edifícios do tipo Urbano com quatro, seis e oito salas, tendo os edifícios de uma e duas salas sido aumentados. No entanto continuou-se a construir escolas do tipo Rural de uma e duas salas [99].



Figura 4.7 – Escola de Mourisca do Vouga, Águeda, Aveiro – tipo Urbano (Arquivo Direção-Geral do Equipamento Escolar)



Figura 4.8 – Escola de Silveirinha, Ribeira Seca, Calheta (Ilha de São Jorge) – tipo Rural (Arquivo Direção-Geral das Construções Escolares)

A revisão dos projetos dos novos edifícios escolares concluiu-se em 1966 com a alteração dos processos de construção e materiais, mantendo o aspeto visual e a funcionalidade dos edifícios. Essas construções passaram a denominar-se tipo Urbano 2 e tipo Rural 2.

A última alteração aos projetos ocorreu em 1971, com a adaptação dos projetos-tipo à nova conceção pedagógica e construtiva, e os edifícios passaram a designar-se tipo Urbano 3 e tipo Rural 3, sendo as características previstas na nova solução as seguintes [99]:

- Aumento do espaço das salas de aula, para uma área quadrada, com 7,10m x 7,10m (mais 2,5 m<sup>2</sup>/sala);
- Criação de áreas de trabalhos manuais, no prolongamento das salas de aula, ocupando parte do recreio coberto;
- Aumento do número de cabines dos blocos sanitários;
- Equipamento das salas com painéis de parede, para expor os trabalhos dos alunos;
- Criação de pequenas arrecadações, junto de cada sala, destinadas ao material escolar e didático;
- Construção de um pequeno recreio coberto para abrigo das crianças, localizado sobre a fachada posterior das escolas.

Hoje em dia, os edifícios do Plano dos Centenários encontram-se degradados e não respeitam as exigências atuais, nomeadamente, no que se refere ao conforto térmico, pois aquando da sua construção, não havia exigências de colocação de isolamentos térmicos. Desta forma, muitas destas escolas encontram-se hoje em dia desativadas, ou foram reabilitadas para outros fins. No entanto, a reabilitação destes edifícios para fins escolares faz todo o sentido, uma vez que têm grande valor arquitetónico e patrimonial e apresentam poucas patologias. Por essa razão, a reabilitação destes edifícios, não exigiria um elevado orçamento.

## **4.2. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE EDIFÍCIOS ESCOLARES**

### **4.2.1. INTRODUÇÃO**

Os edifícios escolares apresentam algumas particularidades em relação aos restantes edifícios, uma vez que a taxa de ocupação é muito elevada, podendo chegar a quatro vezes mais ocupantes por metro quadrado do que num edifício de escritórios, por exemplo. Desta forma, numa reabilitação escolar é necessário prever que elevadas taxas de ocupação implicam ganhos térmicos internos muito significativos e requisitos mais exigentes de ventilação, sendo por isso necessário garantir a qualidade do ar interior. Além disso, é necessário melhorar as condições de iluminação através dos vãos envidraçados nas fachadas (frequentemente acima dos 50%) e ter presente que o sombreamento é um aspeto fundamental, devido às elevadas cargas térmicas geradas pela área envidraçada (ganhos solares) [101].

De modo a assegurar um bom ambiente de trabalho, uma escola deve garantir conforto térmico, acústico e visual. O conforto térmico é obtido quando todos os utilizadores se sentem confortáveis com a temperatura ambiente no decorrer das suas atividades diárias. O conforto acústico alcança-se quando professores e alunos conseguem facilmente ouvir e compreender o que está a ser dito, sem que o som produza eco, haja equipamentos a produzir ruído elevado ou que não sejam impedidos de o fazer pelo ruído exterior ou de espaços adjacentes. Relativamente ao conforto visual garante-se através da qualidade da iluminação que torna as tarefas visuais, tais como a leitura e as apresentações em sala de aula, facilitadas.

Uma outra característica importante numa escola é a qualidade do ar interior, uma vez que o elevado número de pessoas que utilizam o edifício durante um grande período de tempo, assim como a grande suscetibilidade das crianças aos poluentes interiores, como toxinas químicas e agentes biológicos, podem constituir um risco significativo para a saúde das mesmas [65].

A necessidade de reabilitação do parque escolar edificado é uma realidade evidente, uma vez que nas últimas décadas foi possível observar uma progressiva degradação do estado de conservação das instalações escolares, decorrentes, essencialmente, da idade dos edifícios, ausência ou incorreta manutenção dos mesmos [65].

A reabilitação de edifícios escolares, pressupõe, que além da resolução de anomalias construtivas, se melhore o desempenho, aumentando os níveis de qualidade, com o intuito de responder às exigências para o qual o edifício foi concebido inicialmente. Para isso, é necessário encontrar soluções construtivas e ambientais duradouras que garantam uma redução de custos de gestão e de manutenção. O grau de intervenção relaciona-se com o grau de degradação, sendo necessário proceder a um diagnóstico preciso, de modo a adaptar as exigências atuais, permitindo manter a história do edifício [102].

O diagnóstico deve dar mais relevância aos elementos construtivos da envolvente exterior do edifício, uma vez que esta é a zona mais exposta aos agentes de degradação e que condiciona a utilização do edifício numa perspetiva de durabilidade e sustentabilidade. Num diagnóstico, é fundamental caracterizar a solução inicial da envolvente dos edifícios, através da análise de projetos e de fotografias e do conhecimento do histórico de intervenções realizadas, devendo ainda ser realizadas sondagens e medições, sempre que necessário. Neste contexto, e conhecendo os requisitos a satisfazer, procede-se a uma seleção exigencial dos elementos ou sistemas construtivos a adotar e, posteriormente, avalia-se o respetivo desempenho que deverá ser verificado através de ensaios, medições ou a partir de uso de modelos [102].

Após a análise dos elementos selecionados, é necessário proceder ao estudo das necessidades exigidas pela legislação em vigor. Na Tabela 4.1 apresentam-se as exigências a satisfazer pelos elementos da envolvente verticais.

Tabela 4.1 – Exigências a satisfazer na envolvente dos edifícios escolares – MEXREB (Adaptado de Lanzinha/Freitas 2003)

Elemento da envolvente	Zona	Exigência
Elementos verticais	Fachada opaca	Isolamento térmico
		Comportamento ao fogo
		Isolamento acústico
		Estanqueidade à água
		Controlo de condensações
		Ventilação e qualidade do ar interior
		Tratamento de pontes térmicas planas
	Envidraçados	Estanqueidade à água
		Controlo da permeabilidade ao ar
		Isolamento térmico
		Isolamento acústico
		Resistência ao vento
		Fator solar máximo
		Controlo de transmissão luminosa
		Controlo de condensações

Importa ainda que, aquando da definição das soluções a adotar, se prevejam limitações arquitetónicas e históricas do edifício, assim como, se tenha presente que as exigências previstas na legislação muitas vezes são difíceis de cumprir quando se trata de uma reabilitação.

#### 4.2.2. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE PAREDES EXTERIORES

##### 4.2.2.1. Introdução

Quando se pretende melhorar o desempenho térmico, a maioria das intervenções passa pela envolvente, através da colocação ou reforço do isolamento das paredes pelo exterior ou interior ou ainda pela sua colocação na caixa-de-ar, conforme as características das paredes ou inércia térmica. Esta medida permite reduzir o consumo de energia necessária para o aquecimento, uma vez que existe uma diminuição das perdas de calor através da envolvente exterior.

##### 4.2.2.2. Isolamento térmico aplicado pelo exterior

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior representa a solução mais vantajosa, embora nem sempre seja possível em alguns edifícios com características arquitetónicas ou valor patrimonial específicos. A sua aplicação representa uma proteção da parede contra agentes atmosféricos e elimina descontinuidades na camada de isolamento, o que não acontece quando é colocado pelo interior, onde o isolamento apenas pode ir até à altura do pé-direito dessa divisão, contribuindo para as pontes térmicas lineares, nomeadamente, as de ligação da fachada com pavimento de nível intermédio, por exemplo. Além disso, não reduz as dimensões dos espaços interiores, permite que o edifício continue em serviço durante a sua aplicação e ainda, em muitos casos, diminui o risco de incêndios. Por outro lado, existem algumas desvantagens do seu uso, nomeadamente, alterações do aspeto exterior dos edifícios, dificuldade de execução de eventuais ângulos e ressaltos, risco acrescido de fendilhação dos revestimentos em soluções contínuas e, além disso, o custo é, geralmente, mais elevado [103].

As soluções possíveis para aplicação de isolamento térmico pelo exterior são [103]:

- Revestimentos não-isolantes independentes (com interposição de um isolamento térmico na caixa-de-ar):
  - ✓ Revestimentos independentes descontínuos (elementos fixados mecanicamente);
  - ✓ Revestimentos independentes contínuos de ligantes minerais armados (rebocos armados e desligados do suporte).
- Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento sobre isolante (ETICS) (Figura 4.9):
  - ✓ Revestimentos espessos de ligantes minerais, armados (rebocos armados), sobre isolante;
  - ✓ Revestimentos delgados de ligantes sintéticos ou mistos, armados, sobre isolante.
- Revestimentos isolantes:
  - ✓ Revestimentos pré-fabricados isolantes descontínuos (Vetures);
  - ✓ Rebocos isolantes;
  - ✓ Revestimentos de espuma isolante projetada.

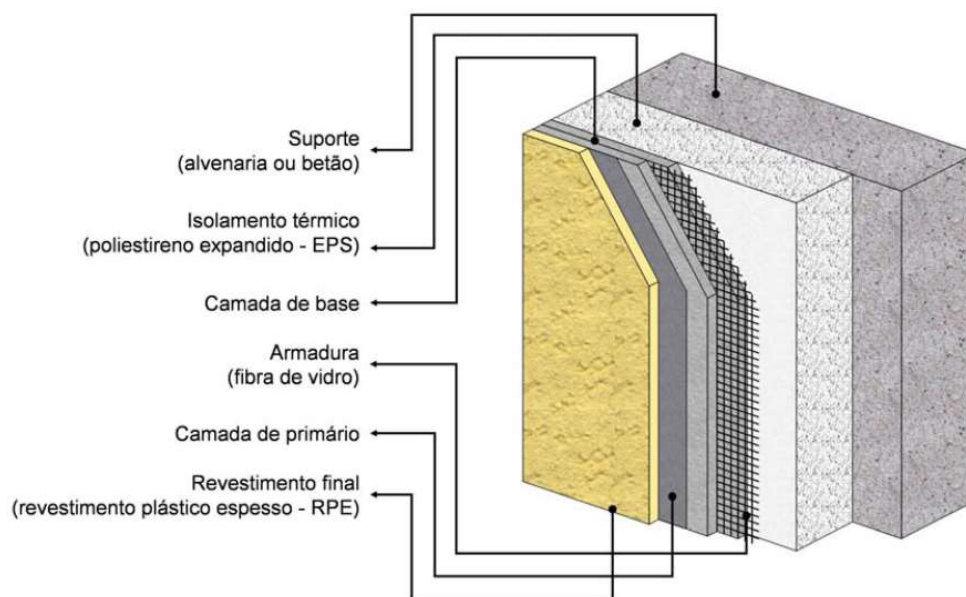


Figura 4.9 – Aplicação de isolamento térmico pelo exterior: sistema ETICS [104]

#### 4.2.2.3. Isolamento térmico aplicado pelo interior

Como anteriormente exposto, em relação à aplicação do isolamento pelo exterior, esta solução é menos vantajosa. No entanto, nos casos onde não é possível alterar o aspeto exterior do edifício e sempre que a perda de espaço no interior, compense as melhorias implementadas através da poupança de energia, esta solução é a mais indicada. Existem algumas vantagens na utilização deste sistema, nomeadamente pelo facto de ser uma solução mais versátil, menos dispendiosa e mais fácil de executar, permitindo ainda reabilitar cada fração separadamente, no caso de edifícios constituídos por frações autónomas. O maior inconveniente é o facto de não corrigir pontes térmicas lineares, nomeadamente na ligação da fachada com pavimento ou fachada com cobertura. As soluções possíveis de aplicação de isolamento térmico pelo interior são [103,105]:

- Painéis isolantes pré-fabricados fixados contra a parede (Figura 4.10);
- Contra fachada:
  - ✓ Com caixa-de-ar simples;
  - ✓ Com interposição de um isolamento térmico e sem caixa-de-ar;
  - ✓ Com interposição de um isolamento térmico e com caixa-de-ar.
- Revestimentos refletores.



Figura 4.10- Aplicação de isolamento térmico pelo interior: colocação de painéis de isolamento prefabricados fixados contra a parede [106]

#### 4.2.2.4. Isolamento térmico aplicado na caixa-de-ar de paredes duplas

Esta solução apenas é exequível quando as paredes exteriores são constituídas por dois panos, sendo possível proceder ao reforço do isolamento térmico na caixa-de-ar através da injeção de isolantes a granel (fibras ou flocos e grânulos de material isolante) ou através da injeção de espumas isolantes (espuma rígida de poliuretano ou espuma de ureia-formaldeído) (Figura 4.11). Estas soluções podem ter algumas condicionantes, como por exemplo, o facto de a caixa-de-ar poder ter uma espessura pequena ou apresentar-se preenchida, o que, em qualquer dos casos, poderá dificultar a aplicação homogénea do isolamento térmico ao longo da parede [103,107].



Figura 4.11 – Aplicação de isolamento térmico em caixa-de-ar: injeção de espuma isolante [108]



#### 4.2.3. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE COBERTURAS

Num edifício, o elemento da envolvente que se encontra mais exposto, tanto no inverno (estação de aquecimento) como, especialmente, no verão (estação de arrefecimento) é a cobertura, tornando-se o elemento que tem uma contribuição mais decisiva para o conforto do espaço interior. Desta forma, e tal como acontece com as paredes exteriores, a cobertura deverá possuir isolamento térmico de modo a reduzir as perdas térmicas no inverno e os ganhos de calor no verão. A escolha do isolamento térmico adequado deverá corresponder a uma ponderação do seu desempenho face às solicitações a que a cobertura é submetida no decorrer da sua vida útil [103,109].

Em coberturas inclinadas, a posição da camada de isolamento térmico condiciona o seu desempenho. Desta forma, o reforço do isolamento térmico das coberturas inclinadas é possível das seguintes formas [103]:

- Desvão útil:
  - ✓ Isolamento térmico aplicado ao longo das vertentes, em posição superior, isto é, sobre as madres;
  - ✓ Isolamento térmico aplicado ao longo das vertentes, em posição inferior, ou seja, sob as varas (Figura 4.12);
- Desvão não útil:
  - ✓ Isolamento térmico aplicado na esteira do teto em posição superior (Figura 4.13);
  - ✓ Isolamento térmico aplicado na esteira do teto, em posição inferior.

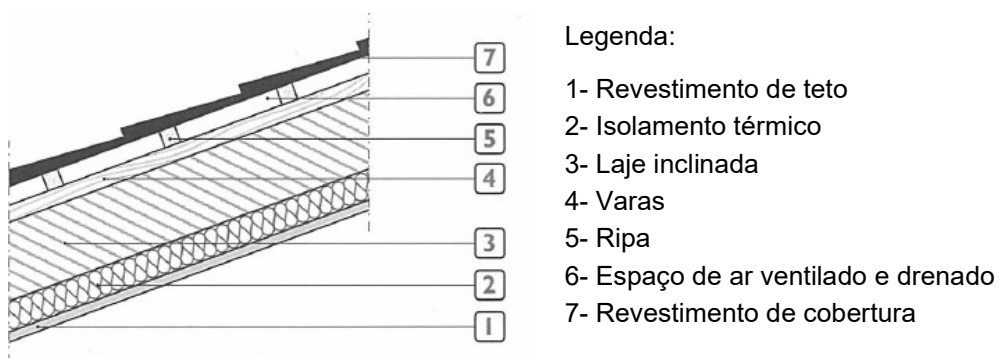


Figura 4.12- Desvão útil: Isolamento térmico aplicado ao longo das vertentes, em posição inferior, ou seja, sob as varas [103]



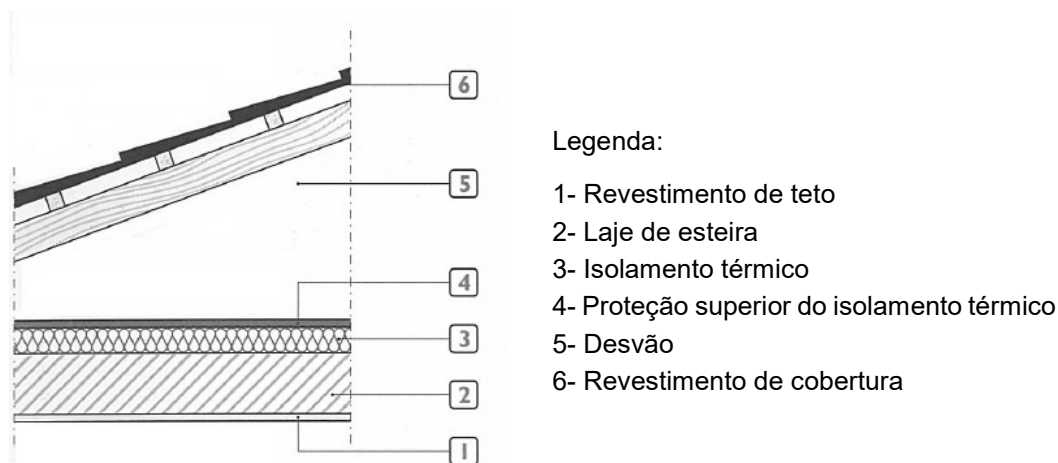


Figura 4.13- Desvão não útil: Isolamento térmico aplicado na esteira do teto em posição superior [103]

No caso de coberturas horizontais, o reforço do isolamento térmico dá-se de três formas distintas:

- Isolamento térmico superior;
- Isolamento térmico inferior;
- Isolamento térmico intermédio.

Nas soluções em que o isolamento térmico se localiza na zona intermédia, é necessário proceder a um levantamento prévio da camada de forma existente, uma vez que são exigidos cuidados especiais na aplicação, de modo a evitar a ocorrência de fenómenos de choque térmico nas camadas subjacentes ao isolamento térmico e consequente fendilhação e degradação dos materiais. Assim, é necessário proceder ao esquartelamento da camada de forma e adotar um sistema de impermeabilização compatível com as condições de suporte [103,107]

Quando o isolamento térmico se localiza na posição inferior da esteira, a sua aplicação apenas é aceite quando o isolamento é integrado num teto-falso desligado da esteira, tendo como inconveniente o facto de não proteger termicamente a estrutura. Se não existir teto-falso, esta solução é desaconselhada, uma vez que a direta aplicação do isolamento contra o paramento inferior da laje contribui para agravar as deformações de origem térmica da mesma [103,107].

Em relação à aplicação do isolamento térmico na parte superior, poderá haver duas soluções de aplicação (Figura 4.14): colocar o isolamento térmico sobre a impermeabilização (cobertura invertida) ou colocar o isolamento térmico sob a impermeabilização (cobertura tradicional). A colocação do isolamento sobre a impermeabilização requer sempre a aplicação de um isolamento térmico com células fechadas e de uma proteção pesada sobre o mesmo. A proteção tem como funções impedir que as placas de isolamento se desloquem e protegê-las contra a incidência direta da radiação solar [103,107].

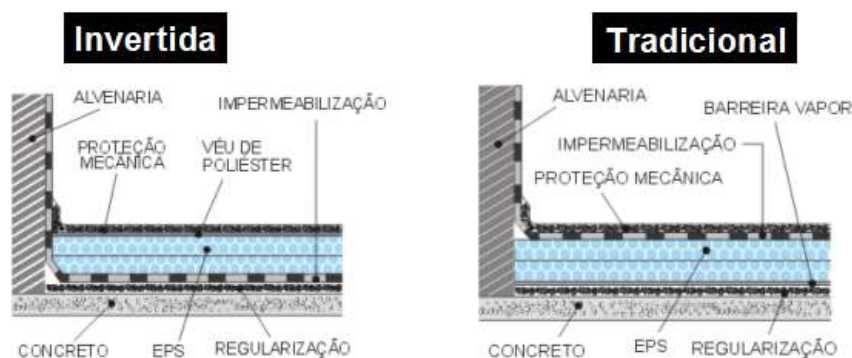


Figura 4.14 – Cobertura invertida e cobertura tradicional [110]

#### 4.2.4. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE PAVIMENTOS

##### 4.2.4.1. Introdução

Existe ainda a possibilidade de isolar termicamente pavimentos em contacto com o solo, pavimentos em contacto com o exterior e pavimentos em contacto com zonas não aquecidas. No entanto, este tipo de reabilitação nem sempre é fácil e requer um elevado custo de investimento. A nível de soluções podem realizar-se três tipos de intervenções nos pavimentos [109]:

- Reabilitação destrutiva: reabilitação em que a totalidade ou grande parte da estrutura é destruída, permanecendo apenas a fachada intacta, sendo necessário realizar uma nova estrutura;
- Reabilitação parcialmente destrutiva: neste tipo de reabilitação as lajes não necessitam de ser totalmente removidas, tendo apenas de se efetuar aberturas para introduzir o material de isolamento;
- Reabilitação não destrutiva: neste caso, os pavimentos permanecem inalterados, sendo necessário encontrar alternativas para a colocação de isolamentos pelo interior.

O reforço do isolamento térmico pode fazer-se segundo três localizações diferentes:

- Isolamento térmico inferior;
- Isolamento térmico superior;
- Isolamento térmico intermédio.

##### 4.2.4.2. Isolamento térmico inferior

As soluções de isolamento térmico inferior (Figura 4.15) são, geralmente, indicadas em reabilitações não destrutivas, quando a zona inferior ao pavimento for acessível, uma vez que são soluções fáceis e rápidas de aplicar, tendo um custo de aplicação pouco dispendioso e garantem uma boa eficiência térmica uma vez que são aplicados no lado exterior. As soluções de aplicação do isolamento térmico inferior sobre espaços exteriores ou não aquecidos são as seguintes [103,109]:

- Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior, com revestimento sobre isolante (ETICS):
  - ✓ Revestimentos espessos de ligantes minerais, armados (rebocos armados), sobre isolante;
  - ✓ Revestimentos delgados de ligantes sintéticos, ou mistos, armados, sobre isolante.

- Revestimentos isolantes:
  - ✓ Revestimentos prefabricados isolantes descontínuos;
  - ✓ Rebocos isolantes;
  - ✓ Projeção de espumas isolantes.
- Tetos falsos:
  - ✓ Tetos falsos isolantes;
  - ✓ Tetos falsos suportando uma camada de isolante térmico.

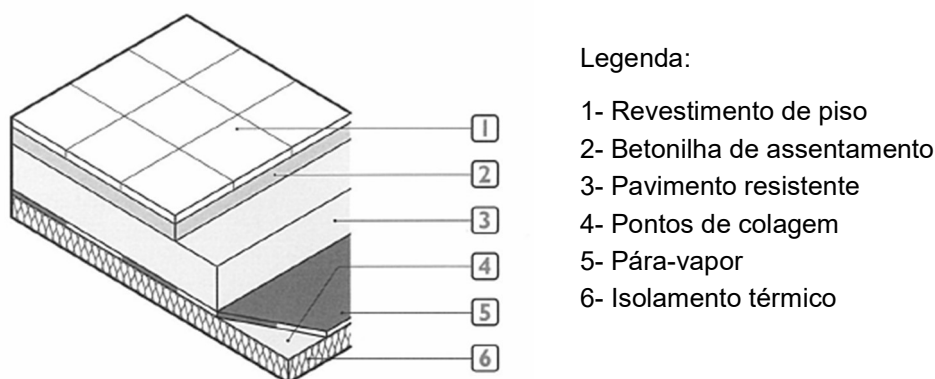


Figura 4.15- Pavimento sobre espaço exterior ou não aquecido: Isolamento térmico inferior [103]

#### 4.2.4.3. Isolamento térmico superior

O facto de se adotar o reforço do isolamento térmico na zona superior do pavimento, pressupõe que o isolamento deva ser capaz de aguentar um valor elevado de cargas e que mantenha o seu comportamento e durabilidade ao longo do tempo. Estas soluções são normalmente utilizadas em casos de reabilitação não destrutiva, sendo que mais uma vez, a sua aplicação reduz o pé-direito da divisão. Neste caso, acresce ainda a redução da inércia térmica do espaço interior e exige um custo mais elevado. As diferentes soluções para reforço do isolamento térmico de pavimentos em posição superior são a introdução de uma camada de isolante de betão leve, entre o pavimento resistente e o revestimento de piso (Figura 4.16), e a aplicação de uma camada de isolamento térmico entre o pavimento resistente e o pavimento flutuante [103,109].

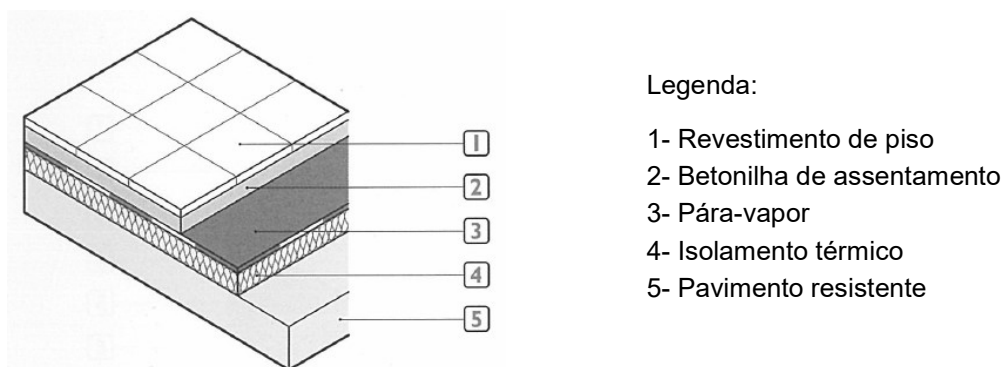


Figura 4.16- Pavimento sobre espaço exterior ou não aquecido: isolamento térmico superior [103]

#### 4.2.4.4. Isolamento térmico intermédio

A aplicação do reforço de isolamento térmico na zona intermédia do pavimento, apenas se consegue com reabilitação destrutiva ou parcialmente destrutiva. No caso de se adotar uma solução parcialmente destrutiva, é necessário proceder ao levantamento de parte do revestimento, sendo, nestas situações, geralmente, utilizado um isolamento a granel. Nas situações de reabilitação destrutiva, o isolamento pode ser colocado logo aquando da construção da laje, com a aplicação, por exemplo, de abobadilhas de EPS, que substituem os blocos cerâmicos ou de betão normal, permitindo desta forma aligeirar o peso próprio da laje, ao mesmo tempo que se reforça termicamente o pavimento. Nesta solução, a rigidez do material isolante, assim como a sua resistência ao fogo e a humidade, não são fundamentais, uma vez que o isolamento térmico estará protegido na parte superior e inferior [103,109].

#### 4.2.5. REABILITAÇÃO TÉRMICA DE VÃOS ENVIDRAÇADOS

Uma vez que os vãos envidraçados são responsáveis por uma boa percentagem de perdas térmicas no inverno e por problemas de sobreaquecimento no verão, urge estudar medidas que minimizem esses impactos. Deste modo, a reabilitação térmica dos vãos envidraçados implica o reforço do respetivo isolamento térmico, a redução das infiltrações de ar não controladas através das juntas de caixilharia e o reforço da proteção contra a penetração indesejável da radiação solar (em particular na estação de arrefecimento) [103].

O comportamento térmico do vão envidraçado resulta do conjunto vidro/caixilharia, uma vez que o sistema (vidro/caixilharia) determina diferentes coeficientes de transmissão térmica. O fator solar do vão envidraçado ( $g_{\perp}$ ) representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado e a radiação nesse incidente e depende principalmente do tipo de vidro [99]7.

De um modo geral, as ações de reabilitação energética dos vãos envidraçados devem incluir [103,111]:

- Reforçar o isolamento térmico;
- Reduzir a permeabilidade ao ar da caixilharia;
- Controlar os ganhos solares através dos vãos envidraçados;
- Fornecer a iluminação natural suficiente ao interior do edifício, sem causar o encandeamento;
- Incorporar dispositivos nas caixilharias que permitam a ventilação natural;
- Minimizar a sensação de desconforto térmico associado ao fenómeno de “superfície fria”.

No reforço do isolamento térmico dos vãos envidraçados, existem várias opções com graus de eficácia diferentes, podendo substituir-se os componentes do vão, nomeadamente as janelas, adaptando-as às exigências atuais ou fazendo a conservação da janela existente. Quando a caixilharia se encontra em bom estado de conservação, poderá, caso a caixilharia o permita, proceder-se à substituição do vidro simples por vidro duplo. Atualmente, existem ainda vidros com propriedades especiais, nomeadamente vidros de baixa emissividade e vidros com lâminas preenchidas com gases raros, como o *árgon*, SF6 ou *krypton*, que reduzem ainda mais as perdas térmicas. Quando é necessário manter a caixilharia existente, poderá instalar-se uma segunda janela pelo interior, com cerca de 10 cm de afastamento. Nos casos onde há excessiva exposição solar, e de modo a minimizá-la, é possível adotar sistemas de sombreamento dos vãos envidraçados, através de palas verticais e/ou horizontais ou dispositivos de proteção solar (Figura 4.17) [107,111].

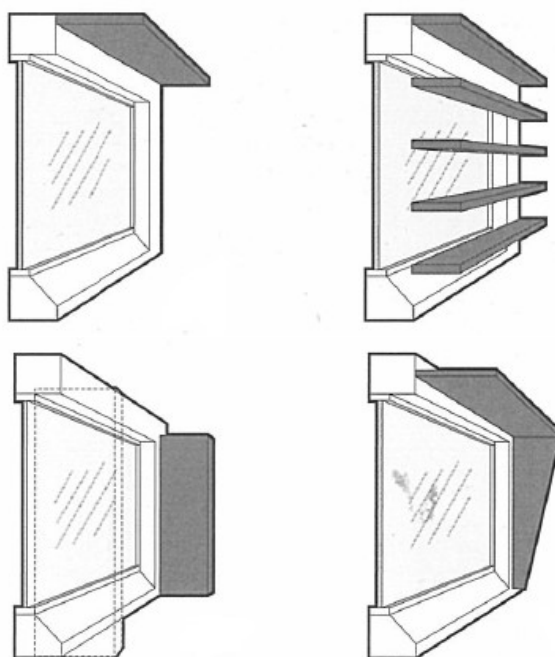


Figura 4.17- Exemplos de proteções solares exteriores [103]

#### 4.2.6. OUTRAS MEDIDAS

A ventilação e qualidade do ar interior dos edifícios escolares, quando não verificada, poderá representar consequências na saúde, aprendizagem e desempenho dos seus utentes, pelo que deverá ser ainda uma preocupação em termos de reabilitação. Os edifícios escolares públicos não reabilitados são dotados de sistemas de ventilação natural, pouco eficientes em termos de QAI e que muitas vezes comprometem o conforto térmico. Por outro lado, não existem sistemas de aquecimento e arrefecimento fixos, utilizando-se em muitos estabelecimentos, soluções de aquecimento pontuais para colmatar este aspeto. Desta forma, é necessário criar medidas que garantam a ventilação dos espaços ( $24 \text{ m}^3/\text{h}$ . ocupante, para salas de aula).

O uso de sistemas de climatização fixos para favorecer o desempenho térmico precisa de ser avaliado a longo prazo, sobretudo no que se refere ao custo de utilização e manutenção dos equipamentos, uma vez que normalmente acabam por deixar de ser utilizados por representarem um elevado impacto económico, comprometendo o desempenho térmico dos espaços, pela ausência de aquecimento/arrefecimento. Deste modo, deverão ser adotadas soluções que minimizem a utilização de equipamentos e potenciem a ventilação natural dos espaços.

Em Portugal, a questão da reabilitação de edifícios escolares apresenta-se como um investimento estratégico, através do “*Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário*” que visa assegurar, entre outros aspetos, um desempenho higrotérmico adequado, a eficiência energética e a qualidade do ar interior dos edifícios, ao mesmo tempo que aproveita os edifícios escolares edificados em estado de degradação [101].

Importa ainda referir, que quando se fala em reabilitação convém ter em atenção a parte económica. Deste modo, a utilização de materiais de desperdício tem aqui um papel importante na gestão de resíduos, na redução de custos, ao mesmo tempo que contribui para uma melhoria do meio ambiente.

### 4.3. MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO EM SALAS DE AULA

O “Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário” tinha como principal objetivo, a recuperação e modernização dos edifícios através dos seguintes aspetos [112]:

- Correção de problemas construtivos existentes;
- Melhoria das condições de habitabilidade e de conforto ambiental, com particular ênfase na higrotérmica, acústica, qualidade do ar, segurança e acessibilidade;
- Adequação de espaços letivos e não letivos e modernização dos respetivos equipamentos;
- Assegurar a flexibilidade e adaptabilidade dos espaços letivos e não letivos, de modo a maximizar a sua utilização e minimizar investimentos no futuro;
- Assegurar a eficácia energética dos edifícios de modo a reduzir os custos de operação.

O programa foi dividido em quatro fases, e uma fase piloto, tendo sido previstas intervenções em 332 edifícios escolares. Na Figura 4.18 apresenta-se um cronograma do “Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário” até à fase três [113].



Figura 4.18 – Cronograma do Programa de Modernização do Parque Escolar [114]

Após a finalização das obras de requalificação da fase 0, 1 e 2, a empresa Parque Escolar deu início à monitorização interna, com o objetivo de identificar o nível de concretização do Programa em todas as vertentes. As melhorias das condições térmicas e acústicas são claras numa primeira fase, tendo sido aplicadas medidas passivas, tais como a aplicação de isolamento nas paredes exteriores e isolamento na cobertura [113]. Uma vez que se pretendeu reduzir os gastos energéticos nos edifícios, a escolha dos sistemas, equipamentos e a sua posterior gestão, obedeceram a critérios que asseguraram eficiência energética. Além disso, foram tidos em conta ainda custos reais de manutenção/exploração dos sistemas e equipamentos utilizados.

Como anteriormente foi mencionado, é na envolvente que se devem adotar as principais soluções construtivas passivas que contribuem para um melhor desempenho energético dos edifícios, promovendo a dinâmica dos sistemas naturais e impedindo as perdas ou ganhos energéticos desnecessários. Neste sentido, a Parque Escolar definiu exigências construtivas e funcionais para a envolvente dos edifícios, conforme o apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Exigências construtivas e funcionais da envolvente (adaptado de [115])

<b>Envolvente [componentes construtivas  exigências funcionais a observar]</b>	<b>Exigências Funcionais</b>	<b>Isolamento Térmico</b>	<b>Sombreamento</b>	<b>Iluminação Natural</b>	<b>Ventilação Natural</b>	<b>Estanquidade</b>	<b>Segurança</b>
	<b>Paredes Exteriores</b>	x	-	-	-	x	x
	<b>Coberturas</b>	x	-	-	-	x	x
	<b>Portas e Janelas [Construção]</b>	x	-	x	x	x	x
	<b>Portas e Janelas [Vidros]</b>	x	x	x	-	-	x

As medidas de melhoria do desempenho energético promovidas pela Parque Escolar foram asseguradas por soluções passivas que beneficiaram a dinâmica dos sistemas naturais, traduzindo-se numa maior tolerância do utilizador às oscilações ambientais (temperatura e humidade relativa) e pretendiam obter um consumo energético mínimo através de uma máxima eficiência energética. Neste sentido, e de modo a promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior, foram adotadas as seguintes medidas [115]:

- Ventilação natural, no mínimo em 50% do caudal nos espaços de ensino;
- Isolamento da envolvente;
- Envidraçados com fator solar apropriado e respetivo sombreamento;
- Iluminação natural em todos os espaços ocupados.

Foram ainda adotadas medidas complementares recomendadas e focadas na eficiência energética, entre as quais a instalação de recuperadores de calor na ventilação mecânica, a instalação de equipamentos e sistemas ativos de alta eficiência energética (por exemplo, sistemas de AVAC, aparelhos de iluminação, etc.), a utilização de energias renováveis (solar térmica ou solar fotovoltaica) e ainda a instalação de sensores de luminosidade e presença. Desta forma, a aplicação eficaz das soluções passivas nos edifícios escolares contribuía para a redução dos consumos energéticos, assegurando de forma natural o conforto térmico dos ocupantes, nomeadamente, ao nível do isolamento térmico, sombreamento dos vãos, ventilação natural e ainda iluminação natural [115].

As medidas de avaliação de materiais e sistemas, assim como o âmbito de aplicação encontram-se sintetizadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Avaliação de materiais e sistemas e âmbito de aplicação (adaptado de [115])

Isolamentos térmicos		Avaliação		Âmbito de Aplicação	
Condições	Soluções	Exigências essenciais da construção, custo de ciclo de vida e condições de execução		Paredes	Cobertura
Soluções aceites	<b>A.</b> Isolamento térmico pelo exterior (ETICS) <b>B.</b> Isolamento térmico em caixa de ar com correção integral de pontes térmicas <b>C.</b> Sistema de isolamento térmico invertido <b>D.</b> Cobertura inclinada em desvãos com equipamentos <b>E.</b> Cobertura inclinada na laje de esteira em desvãos não utilizados	Positivo	<b>(A.C.D.E)</b> Bom desempenho energético <b>(A.B.C.D.E)</b> Baixo custo de investimento <b>(A.B.C.D.E)</b> Baixo custo de conservação e manutenção <b>(A.B.C.D.E)</b> Execução corrente	<b>A, B</b>	<b>C, D, E</b>
		Crítico	<b>(B)</b> Fraco desempenho energético		
Soluções Condicionadas	<b>F.</b> Fachadas ventiladas com elementos modulares <b>G.</b> Cobertura plana tradicional [membranas de PVC ou sistema certificado para o efeito]	Positivo	<b>(F. G)</b> Bom desempenho energético <b>(F)</b> Execução corrente <b>(G)</b> Baixo custo de investimento	<b>F</b>	<b>G</b>
		Crítico	<b>(F)</b> Custo de investimento potencialmente elevado <b>(F. G)</b> Custo de conservação e manutenção potencialmente elevado <b>(G)</b> Não totalmente adequado ao uso <b>(G)</b> Execução potencialmente complexa		
Soluções não aceites	Isolamento térmico pelo interior	Positivo	▪ Baixo custo de investimento ▪ Execução corrente	-	-
		Crítico	▪ Mau desempenho em termos energéticos; ▪ Não totalmente adequado ao uso; ▪ Custo de conservação e manutenção potencialmente elevado.		



Em 2009, a Parque Escolar delineou medidas no âmbito da térmica para as situações onde foi necessário proceder à construção de novos edifícios que teriam de obedecer às seguintes condições [115]:

- A envolvente do edifício deverá ser termicamente isolada pelo exterior (tipo ETICS ou fachada ventilada). As paredes duplas deverão ser isoladas do lado interior da caixa-de-ar (o pano mais espesso deve ser o exterior) devendo a caixa-de-ar ser ventilada;
- A cobertura deverá ser ventilada pelo exterior do isolamento sempre que a sua cor não seja clara. Em coberturas inclinadas, o isolamento deverá ser aplicado sobre a laje de esteira e sob o desvão ventilado. O isolamento na cobertura deverá ser aproximadamente 30% superior ao das paredes verticais; em coberturas horizontais deverão ter um sistema de isolamento invertido sempre que exista telas de impermeabilização;
- Os vãos envidraçados deverão ter uma transmissão térmica baixa com uma dimensão e configuração que possibilite uma apropriada iluminação do espaço, geralmente em profundidade, onde a sua altura e proximidade do teto refletor é relevante; deverão possuir aberturas ao nível dos ocupantes para ventilação direta e permitir uma ventilação noturna permanente no verão, garantindo a segurança;
- O sombreamento a Sul poderá ser efetuado por palas fixas horizontais exteriores, superiores ao vão com uma dimensão de cerca de 1/3 da sua altura. A Nascente e a Poente também deverão ter-se em conta o sombreamento, sendo este constituído por dispositivos móveis verticais exteriores. A Norte não será necessária uma grande preocupação a este nível.

Em seguida, apresenta-se uma síntese da caracterização da envolvente exterior, dos coeficientes de transmissão térmica e dos fatores solares das soluções construtivas tipo, utilizadas pela empresa Parque Escolar, aquando da reabilitação das envolventes de edifícios escolares (Tabela 4.4). Importa referir que, no seu planeamento da reabilitação do parque escolar edificado, a Parque Escolar previu o cumprimento de requisitos do revogado RCCTE [14] e transposto para o atual RECS [11].

Tabela 4.4 - Caracterização construtiva e térmica representativa da envolvente exterior de escolas reabilitadas pela Parque Escolar [116]

Elemento envolvente	Caraterização	U (W/m <sup>2</sup> .°C)	g <sub>⊥</sub>
<b>Cobertura</b>	Cobertura inclinada, revestimento em telha cerâmica, isolamento sobre laje de esteira	0,31	-
	Cobertura inclinada, revestimento em telha cerâmica, isolamento sobre laje inclinada	0,42	
	Cobertura horizontal, com isolamento térmico, com revestimentos diversos	[0,26 – 0,35]	
<b>Paredes exteriores</b>	Parede existente associada a uma forra interior que resulta de uma combinação de dois ou mais dos seguintes componentes: isolamento térmico, gesso cartonado, caixa de ar, pano de alvenaria em tijolo furado	[0,69 – 0,47]	-
	Parede existente revestida com sistema ETICS pelo exterior	0,73	
	Parede dupla (20 + 11cm) com isolamento térmico na caixa de ar	0,45	

<b>Vãos envidraçados</b>	Caixilharias de alumínio	3,4	0,52 0,26 (100% sombreamento)
	Sem corte térmico		
	Sistema basculante, batente e fixo		
	Vidro duplo, um deles de baixa emissividade		
	Estores interiores de rolo opacos		

Na Figura 4.19 é possível verificar o aspeto interior de uma sala antes e após a intervenção do Parque Escolar.



Figura 4.19- Escola Secundária de Montemor-o-Velho antes (esquerda) e depois (direita) da intervenção da Parque Escolar [117]

Face à necessidade de instalar sistemas de ventilação, aquecimento e arrefecimento em salas de aula, a Parque Escolar, definiu a preferência pelo estudo de soluções de ventilação natural, que garantissem os caudais de ar de renovação requeridos pela regulamentação. No entanto, os valores pretendidos foram difíceis de cumprir, utilizando apenas a ventilação natural, sem que se comprometesse o conforto térmico, e desta forma foram instalados os sistemas de ventilação e climatização que se apresentam na Tabela 4.5. É de conhecimento geral, que os sistemas de aquecimento e arrefecimento promovidos pela Parque Escolar foram um mau investimento, atendendo aos elevados custos associados à sua utilização e manutenção, o que, se reflete num mau desempenho térmico das salas, uma vez que as escolas não têm verbas para uma utilização constante desses equipamentos. Deste modo, as salas de aula, apesar de reabilitadas com os isolamentos térmicos adequados, continuam a apresentar um fraco desempenho térmico, pois quando dimensionados, os isolamentos térmicos previam uma necessidade de aquecimento e arrefecimento que não é cumprida, comprometendo assim, o desempenho térmico dos espaços [118].

Tabela 4.5 – Sistemas de ventilação e climatização instalados [118]

Elemento	Caraterização
<b>Sistema de ventilação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Insuflação e extração mecânica (salas de aula, espaços administrativos e instalações de serviço)</li> <li>▪ Controlo e programação por GTC (Gestão Técnica Centralizada)</li> </ul>
<b>Sistema de aquecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sistema de radiadores alimentados com água quente</li> <li>▪ Controlo e programação por GTC</li> </ul>
<b>Sistema de arrefecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sistemas centralizados de arrefecimento</li> <li>▪ Controlo e programação por GTC</li> </ul>

O “Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar” apresentou medidas que proporcionaram melhorias do desempenho térmico em salas de aula, entre as quais a redução ao mínimo das aberturas de vãos a Norte, de modo a evitar as perdas térmicas durante o inverno, e a poente, para evitar a grande incidência solar durante o verão e decorrente sobreaquecimento. Além disso, nos vãos envidraçados das salas de aula utilizaram-se proteções solares exteriores e interiores. As proteções exteriores, do tipo palas horizontais em vãos envidraçados orientados para Sul e verticais para Nascente e Poente, permitiram evitar a incidência direta dos raios solares a partir da meia-estação (entre março e setembro). Foram ainda utilizados outros elementos fixos, semifixos ou amovíveis, com a mesma funcionalidade. As proteções interiores, do tipo cortinas reguláveis e não opacas, utilizadas, destinam-se a evitar a incidência solar direta durante a estação fria (setembro a março), altura em que é desejável a incidência solar direta nos envidraçados, de forma a produzir o aquecimento natural dos espaços interiores (sistema passivo de ganho direto). As envolventes dos edifícios (paredes exteriores e cobertura) foram isoladas de modo a obter valores limite de 18°C para inverno e de 24°C para verão, considerando o valor médio de humidade relativa entre 35% e 70% [119].

A renovação de ar foi assegurada preferencialmente por meios naturais, de fácil manuseamento, tendo sido previsto, nos espaços de ensino, vãos com folhas basculantes reguláveis, para ventilação natural, sempre que possível cruzada. Nas salas onde apenas havia uma fachada exterior, recorreu-se a bandeiras de porta reguláveis ou a vãos basculantes abertos. Quando a ventilação natural não foi suficiente, previram-se sistemas de ventilação mecânica forçada. As renovações de ar em salas de aula foram estabelecidas a três renovações de ar por hora [119].

Atualmente, existem alguns estudos higrotérmicos realizados em salas de aula reabilitadas, como em [116], que realizou um estudo onde efetuou a caracterização do desempenho higrotérmico em serviço de quatro salas reabilitadas através de uma campanha experimental que permitiu estudar as condições interiores higrotérmicas e de qualidade do ar das salas em estudo. Em cada sala foram instaladas uma sonda de leitura de temperatura e humidade relativa e uma sonda de medição de concentração de CO<sub>2</sub>. As leituras de temperatura, em salas de aula, revelam que as soluções de sistemas de climatização e reabilitação da envolvente oferecem condições de conforto térmico muito satisfatórias, cumprindo os limites do RECS, com temperaturas entre 20°C e 25°C, em cerca de 70% do tempo de ocupação. Os valores de humidade relativa mostram que os riscos de condensações superficiais são praticamente nulos, e que durante 70% do período de ocupação, estes se situam entre os valores de 30% e 60%, recomendados pela ASHRAE [120]. De um modo geral, tanto em soluções construtivas, como em sistemas de ventilação e climatização, as soluções estudadas são menos dispendiosas que as intervenções realizadas pela Parque Escolar. Concluiu-se ainda que as soluções adotadas pela Parque Escolar, relativas à instalação de sistemas de ventilação e climatização puramente mecânicos, estão associadas a custos iniciais de exploração e manutenção elevados e a uma elevada intrusão no edificado a reabilitar (Figura 4.20).



Figura 4.20- Instalação de AVAC da Parque Escolar pelo exterior em escolas reabilitadas [121]

Segundo [122], em três escolas, na zona Norte, foram adotadas melhorias de desempenho térmico, nomeadamente, através da colocação de ETICS (Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior). Os resultados da sua aplicação revelaram um comportamento ajustado às necessidades tendo sido, do ponto de vista prático de obra, uma solução sem grandes restrições de ocupação, não tendo havido redução do espaço habitável do edifício construído e foram ainda evitadas demolições, uma vez que foi possível trabalhar sobre a solução existente. Nestas três escolas, procedeu-se também à substituição integral dos vãos exteriores (caixilho e vidro), uma vez que, após a aplicação do ETICS, foi necessário garantir que os antigos vãos exteriores não seriam um elemento de descontinuidade na envolvente. Desta forma, foram colocados caixilhos e vidros com características técnicas adequadas e capazes de assegurar o desempenho final da fachada, para que no seu todo, se atingissem as exigências necessárias decorrentes das características de utilização. Assim, a reabilitação com substituição dos vãos envidraçados, possibilitou um reforço do isolamento térmico e acústico, permitiu reduzir as infiltrações de ar não controladas, aumentar a captação de ganhos solares no inverno e reforçar a proteção da radiação solar durante o verão. Para as paredes divisórias das salas de aula utilizaram-se blocos de betão leve de argila expandida, de modo a minimizar o efeito sonoro e aumentar o desempenho térmico. Relativamente ao revestimento dos tetos, e uma vez que a integração de instalação de equipamentos elétricos, sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado e AVAC foi total nas salas de aula, adotou-se um revestimento que permitisse cumprir as exigências a nível de conforto acústico.

De um modo geral, nas três escolas em estudo, concluiu-se que o sistema ETICS permitiu aumentar a inércia térmica interior dos edifícios, uma vez que a maior parte da massa das paredes se encontra pelo interior do isolamento térmico. Este facto traduziu-se na melhoria do conforto térmico de inverno, devido à capacidade de regulação e aproveitamento dos ganhos solares, em que o isolamento funciona como barreira à saída do calor proveniente dos raios solares que penetram no interior do edifício. Em relação ao verão, houve também uma melhoria do conforto térmico, dado que o aumento da inércia térmica permite absorver o calor nas horas mais quentes do dia a fim de o restituir durante a noite, e desta forma atrasar o pico horário. Neste caso, o isolamento funciona como barreira à entrada de calor, pois este leva mais tempo a chegar à massa interior das paredes e ao interior do edifício, ao mesmo tempo que o reserva até à noite [122].

Em Portugal, hoje em dia, existem muitas escolas secundárias reabilitadas, pelo “*Programa de Modernização do Parque Escolar*”. É importante perceber que outras escolas de diferentes tipologias, começam a denotar um grande estado de degradação, e que, caso não seja possível proceder à reabilitação total dos edifícios, por falta de financiamento, existem pequenas medidas que podem ser realizadas, sem grandes custos e que podem melhorar significativamente o desempenho dos edifícios. É necessário estudar essas possibilidades a fim de salvaguardar os edifícios, tornando-os mais duráveis. Neste sentido, urge encontrar soluções sustentáveis que potenciem o aproveitamento da energia solar disponível em Portugal e rentabilizem os desperdícios, sobretudo industriais, que podem ser reaproveitados para uma construção sustentável.

#### **4.4. RESUMO DO CAPÍTULO**

Uma vez que a sala de aula, objeto de estudo neste trabalho, integra uma escola primária do Plano dos Centenários, o capítulo 4 inicia-se com a apresentação deste Plano que constituiu um projeto de construção de escolas em larga escala, levado a cabo pelo Estado Novo em Portugal, entre 1941 e 1974. Pretendia-se com este Plano, não só reorganizar os edifícios de ensino primário, mas também permitir às crianças o acesso a uma escola perto da residência, como medida para reduzir o analfabetismo em Portugal. Os projetos-tipo escolhidos, denominados “Projetos Regionalizados” e já aplicados em 1935, foram entregues a dois arquitetos, Rogério Azevedo e Raúl Lino. Os edifícios do Plano dos Centenários previam divisões arquitetónicas de base que tornavam clara a divisão por sexos, tanto nas entradas, como na separação das salas (com alas e pisos diferentes) e ainda recreios divididos. O número elevado de escolas a construir determinou que se procedesse a uma revisão dos projetos iniciais, a fim de baixar o orçamento das mesmas e durante a sua construção, foram-se realizando ajustes com o objetivo de se corrigirem as deficiências de funcionamento e conforto que iam sendo detetadas, bem como para dar resposta a novas exigências emanadas do Orçamento de Estado.

Em 1956 foi elaborado um anteprojecto que definia duas novas soluções denominadas solução tipo Urbano utilizada em aglomerados urbanos, com um certo desenvolvimento económico e a solução tipo Rural, para localidades rurais e pouco desenvolvidas. Os edifícios do tipo Urbano caracterizam-se por apresentar uma ou duas salas de 8,0 x 6,0 m, com um pé-direito de 3,5 m, um vestiário dimensionado de forma a nele se poder desenvolver uma escada, caso o edifício viesse a ter mais um andar, um recreio coberto com alpendre, blocos sanitários e uma arrecadação. Os edifícios do tipo Rural eram compostos por uma sala de 8,0 x 6,0 m, com 3,5 m de pé-direito, um anexo com dois compartimentos sanitários e um pequeno abrigo coberto na zona de entrada.

Em 1966, concluiu-se a revisão dos projetos dos novos edifícios, tendo-se alterado os processos de construção e materiais, mantendo o aspeto visual e a funcionalidade dos edifícios. Essas construções passaram a denominar-se tipo Urbano 2 e tipo Rural 2. A última alteração aos projetos verificou-se em 1971, tendo-se adaptado os projetos-tipo à nova conceção pedagógica e construtiva, e os edifícios passaram a designar-se tipo Urbano 3 e tipo Rural 3.

Atualmente, é visível a degradação destes edifícios que, inclusivamente, não cumprem as exigências atuais no que se refere ao conforto térmico, pelo que alguns destes espaços escolares se encontram desativados, embora outros tenham sido reabilitados para cumprirem outras funções. No entanto, a reabilitação destes edifícios, com a sua função original, ainda faz sentido pelo valor arquitetónico e patrimonial que representam e pelo potencial da estrutura, além de que o custo de reabilitação seria reduzido, pois apresentam patologias, muitas delas fáceis de resolver.

Em termos de reabilitação, os edifícios escolares apresentam particularidades diferentes dos restantes edifícios, considerando que a taxa de ocupação destes é muito elevada o que implica ganhos térmicos internos muito significativos e requisitos mais exigentes de ventilação, sendo por isso necessário garantir a qualidade do ar interior. Deste modo, deverá garantir-se um bom ambiente de trabalho através do conforto térmico, acústico e visual das salas de aula. Além disso, a qualidade do ar interior é igualmente importante, uma vez que existe um elevado número de pessoas a utilizar o edifício durante grandes períodos, e deverá ter-se em conta a grande suscetibilidade das crianças aos poluentes interiores que podem constituir um risco significativo para a saúde das mesmas.

A reabilitação de edifícios escolares implica a resolução de anomalias construtivas e da melhoria do desempenho local ou geral dos edifícios aumentando os níveis de qualidade e respondendo às exigências para o qual o edifício foi concebido inicialmente. Por essa razão, importa encontrar soluções construtivas e ambientais duradouras para garantir uma redução de custos de gestão e de manutenção. O grau de intervenção relaciona-se com o grau de degradação, sendo necessário proceder a um diagnóstico preciso, de modo a adaptar as exigências atuais, permitindo manter a história do edifício.

Para realizar o diagnóstico, é fundamental caracterizar a solução inicial da envolvente dos edifícios, através da análise de projetos e de fotografias e do conhecimento do histórico de intervenções realizadas, devendo ainda ser realizadas sondagens e medições, etc. Neste contexto, e conhecendo os requisitos a satisfazer, procede-se a uma seleção exigencial dos elementos ou sistemas construtivos a adotar e, posteriormente, avalia-se o respetivo desempenho que deverá ser verificado através de ensaios, medições ou a partir de uso de modelos. Importa também que, aquando da definição das soluções a adotar, se prevejam limitações arquitetónicas e históricas do edifício, assim como, se tenha presente que as exigências previstas na legislação muitas vezes são difíceis de cumprir quando se trata de uma reabilitação.

Quando se pretende melhorar o desempenho térmico, a maioria das intervenções passa pela envolvente, através da colocação ou reforço do isolamento das paredes uma vez que essa medida permite reduzir o consumo de energia necessária para o aquecimento, uma vez que existe uma diminuição das perdas de calor através da envolvente exterior. O elemento da envolvente que se encontra mais exposto, tanto no inverno como no verão, é a cobertura, sendo que tem uma contribuição mais decisiva para o conforto do espaço interior. Desta forma, e tal como acontece com as paredes exteriores, a cobertura deverá possuir isolamento térmico de modo a reduzir as perdas térmicas no inverno e os ganhos de calor no verão. A escolha do isolamento térmico adequado deverá corresponder a uma ponderação do seu desempenho face às solicitações a que a cobertura é submetida no decorrer da sua vida útil.

Uma vez que os vãos envidraçados são responsáveis por grande percentagem de perdas térmicas no inverno e por problemas de sobreaquecimento no verão, a reabilitação térmica dos vãos envidraçados é igualmente necessária. Implica o reforço do respetivo isolamento térmico, a redução das infiltrações de ar não controladas através das juntas de caixilharia e o reforço da proteção contra a penetração indesejável da radiação solar (em particular na estação de arrefecimento). Existe ainda a possibilidade de isolar termicamente pavimentos em contacto com o solo, pavimentos em contacto com o exterior e pavimentos em contacto com zonas não aquecidas. No entanto, este tipo de reabilitação nem sempre é fácil e requer um elevado custo de investimento inicial.

Os edifícios escolares públicos não reabilitados são dotados de sistemas de ventilação natural, pouco eficientes em termos de QAI e que muitas vezes comprometem o conforto térmico geral e localizado. Além disso, não existem sistemas de aquecimento e arrefecimento fixos, utilizando-se em muitos estabelecimentos, soluções de aquecimento pontuais para colmatar este aspeto. Desta forma, é necessário criar medidas que garantam a ventilação dos espaços. Os equipamentos de climatização fixos existentes, nem sempre são os mais adequados, uma vez que representam um elevado custo de utilização e manutenção, sendo por isso necessário serem avaliados a longo prazo antes da sua instalação em edifícios escolares.

Em Portugal, a questão da reabilitação de edifícios escolares apresenta-se como um investimento estratégico, através do *“Programa de Modernização das Escolas de Ensino Secundário”* que visa assegurar, entre outros aspetos, um desempenho higratérmico adequado, a eficiência energética e a qualidade do ar interior dos edifícios, ao mesmo tempo que aproveita os edifícios escolares edificados em estado de degradação.

Outros programas que pretenderam melhorar o desempenho térmico em salas de aula foram implementados, como o “*Programa Nacional de Requalificação da Rede do 1.º Ciclo do Ensino Básico e da Educação Pré-escolar*” apresentando medidas, para evitar as perdas térmicas durante o inverno, e para evitar a grande incidência solar durante o verão e decorrente sobreaquecimento e a instalação de proteções solares interiores e exteriores. Houve ainda a preocupação de isolar as envolventes (paredes exteriores e interiores) de modo a obter valores limite de 18°C para inverno e de 24°C para verão, considerando o valor médio de humidade relativa entre 35% e 70%. A renovação de ar foi assegurada preferencialmente por meios naturais, tendo sido previsto nos espaços de ensino, vãos com folhas basculantes reguláveis, para ventilação natural, sempre que possível cruzada. Quando a ventilação natural não foi suficiente, previram-se sistemas de ventilação mecânica forçada. As renovações de ar em salas de aula foram estabelecidas a três renovações de ar por hora.

Em estudos recentes [116] demonstra que as melhorias de desempenho térmico adotadas pela Parque Escolar relativas à instalação de sistemas de ventilação e climatização puramente mecânicos, estão associadas a custos iniciais de exploração e manutenção elevados e a uma elevada intrusão no edificado a reabilitar. No caso em estudo, as leituras de temperatura, em salas de aula, revelam que as soluções de sistemas de climatização e reabilitação da envolvente oferecem condições de conforto térmico muito satisfatórias, cumprindo os limites do RECS. De um modo geral, as soluções estudadas são menos dispendiosas que as intervenções realizadas pela Parque Escolar.

Em [122] foram estudadas três escolas, onde foram aplicadas melhorias de desempenho térmico, e cujos resultados revelaram um comportamento ajustado às necessidades, permitindo aumentar a inércia térmica interior dos edifícios, uma vez que a maior parte da massa das paredes se encontra pelo interior do isolamento térmico. Este facto traduziu-se na melhoria do conforto térmico de inverno, devido à capacidade de regulação e aproveitamento dos ganhos solares. Em relação ao verão, houve também uma melhoria do conforto térmico, dado que o aumento da inércia térmica permite absorver o calor nas horas mais quentes do dia a fim de o restituir durante a noite, e desta forma atrasar o pico horário.

É importante perceber que outras escolas de diferentes tipologias, começam a denotar um grande estado de degradação, e que, caso não seja possível proceder à reabilitação total dos edifícios, por falta de financiamento, existem pequenas medidas que podem ser realizadas, sem grandes custos e que podem melhorar significativamente o desempenho dos edifícios. É necessário estudar essas possibilidades a fim de salvaguardar os edifícios, tornando-os mais duráveis. Neste sentido, urge encontrar soluções sustentáveis que potenciem o aproveitamento da energia solar disponível em Portugal e rentabilizem os desperdícios, sobretudo industriais, que podem ser reaproveitados para uma construção sustentável.





## 5

## CASO DE ESTUDO

## 5.1. ESCOLA EB1 DE CANDOSO SANTIAGO

A Escola EB1 de Candoso Santiago situa-se na cidade de Guimarães, no distrito de Braga e pertence à união das freguesias de Candoso Santiago e Mascotelos. Foi construída no ano de 1966, sendo um edifício escolar do Plano dos Centenários. Caracteriza-se por ser um edifício com quatro salas, distribuídas em dois blocos geminados de dois pisos, tendo cada bloco uma entrada diferente destinada aos sexos masculino e feminino (Figura 5.1). Considerando a data da construção, e pelo levantamento dimensional *in situ*, é possível perceber que o projeto da escola é do tipo Urbano, pois apresenta salas de aula de 8,0 x 6,0 m e um pé-direito de 3,5m.

Hoje em dia, a escola encontra-se desativada, essencialmente, devido à não existência de condições térmicas que garantam um conforto mínimo. Importa referir que, para o caso em estudo, não foram disponibilizadas quaisquer informações referentes a plantas do edifício, materiais utilizados e históricos de intervenção. Por essa razão, todas as informações que se apresentam de seguida, foram obtidas nas visitas ao local e através do levantamento dimensional dos espaços. Apesar disso, da leitura do Projeto Educativo do Agrupamento [123] infere-se que o edifício foi sofrendo, ao longo dos anos, algumas alterações, nomeadamente através da construção de uma pequena sala de 25 m<sup>2</sup>, uma pequena sala multifunções (biblioteca, informática, reuniões e de apoio) e ainda um miniginásio que também servia de abrigo às crianças em dias de chuva. Foi ainda construído e inaugurado no ano de 1997/1998, um refeitório no espaço exterior ao edifício (recreio) (Figura 5.2) e um coberto (Figura 5.3). Em 2003/2004, parte do recreio foi pavimentado, tendo-se criado dois campos de jogos, nomeadamente de futebol e basquetebol (Figura 5.3 e 5.4).



Figura 5.1 - Fachada principal do edifício



Figura 5.2 – Edifício do refeitório



Figura 5.3 – Campo de basquetebol, coberto e acrescento ao edifício principal



Figura 5.4 – Campo de futebol e acrescento ao edifício principal

Neste trabalho, será apresentado um estudo da melhoria do desempenho térmico de uma sala de aula deste edifício, nomeadamente da sala de aula do rés-do-chão do lado esquerdo do edifício. Esta sala tem as dimensões de 8 x 6 m com um pé-direito de 3,5 m e caracteriza-se por possuir três vãos envidraçados de 1,56 x 1,93 m, orientados a Este, que correspondem a cerca de 32,25% da área da parede em contacto com o exterior (Figura 5.5 e 5.6).



Figura 5.5 – Sala de aula: vista do exterior



Figura 5.6 – Sala de aula: vista do interior

Possui ainda duas grelhas de ventilação passiva (Figura 5.7) com as dimensões aproximadas de 0,12 x 0,56 m, a cerca de 0,30 m do teto e que permitem a passagem de ar para a divisão que se encontra no lado oposto da parede, neste caso o miniginásio. No projeto original, essa passagem de ar ocorreria com o exterior, como acontece nas salas do piso superior. A porta de entrada da sala tem a dimensão de 1,0 x 2,0 m, é de madeira e encontra-se degradada apresentando uma fissura profunda que a atravessa em toda a espessura (Figura 5.8).

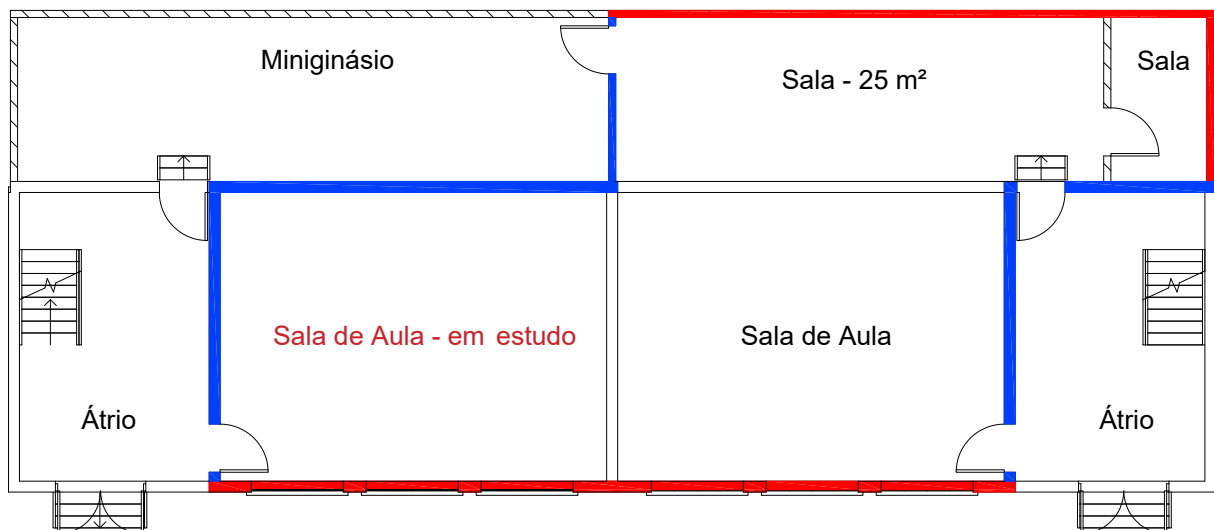


Figura 5.7 - Grelhas de ventilação



Figura 5.8 - Porta de entrada da sala de aula

As envolventes da sala são, no rés-do-chão (Figura 5.9), uma parede em contacto com o exterior, definida como a envolvente exterior da sala, uma parede em contacto com o átrio da escola e zona de escadas e a parede oposta à parede exterior em contacto com o miniginásio (espaços não aquecidos) que definem a envolvente interior. Uma vez que a escola é constituída por dois blocos geminados, na parede oposta à parede de entrada na sala, existe uma sala idêntica à sala em estudo. Relativamente às envolventes superiores e inferiores desta sala, o teto está em contacto com uma sala idêntica no piso 1 (Figura 5.10), e o pavimento encontra-se em contacto com o solo.

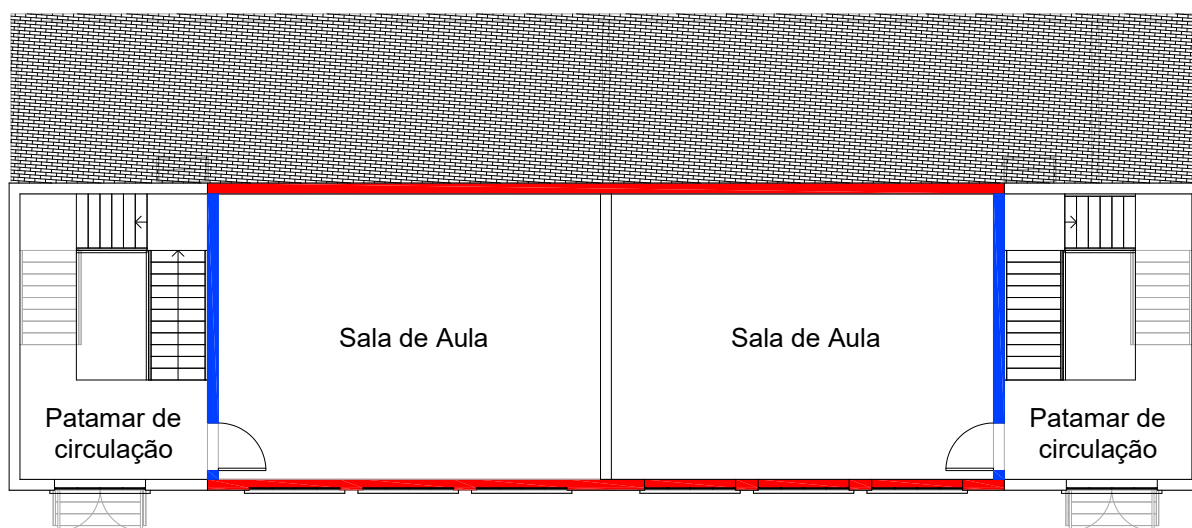


### Planta Rés-do-Chão

- Envolvente exterior
- Envolvente interior



Figura 5.9 - Planta do Rés-do-Chão da escola (elaborado com recurso ao *software Revit*)



### Planta Piso 1

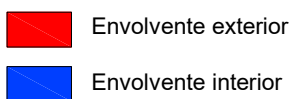


Figura 5.10 – Planta do Piso 1 da escola (elaborado com recurso ao *software Revit*)

Nas Figuras 5.11 a 5.14 é possível observar os diferentes alçados da escola.

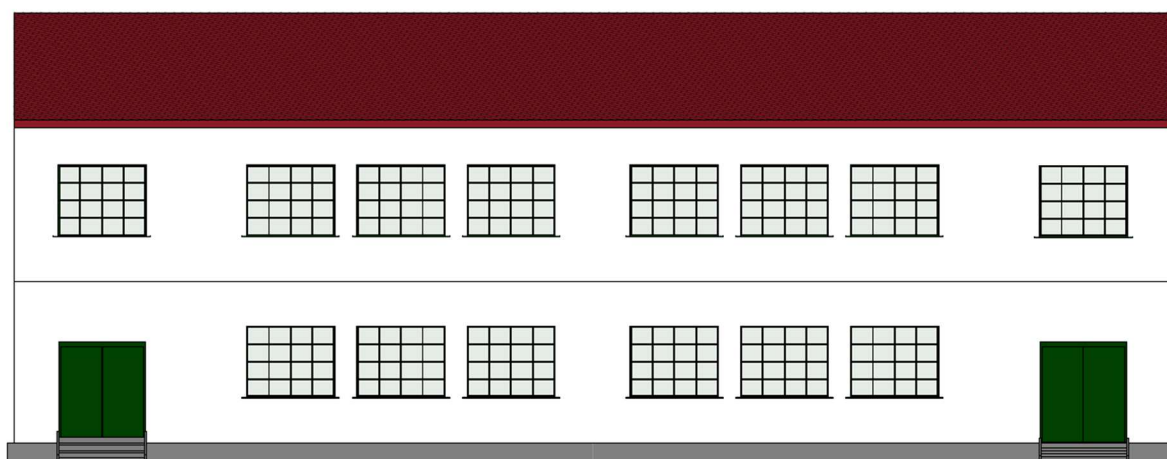
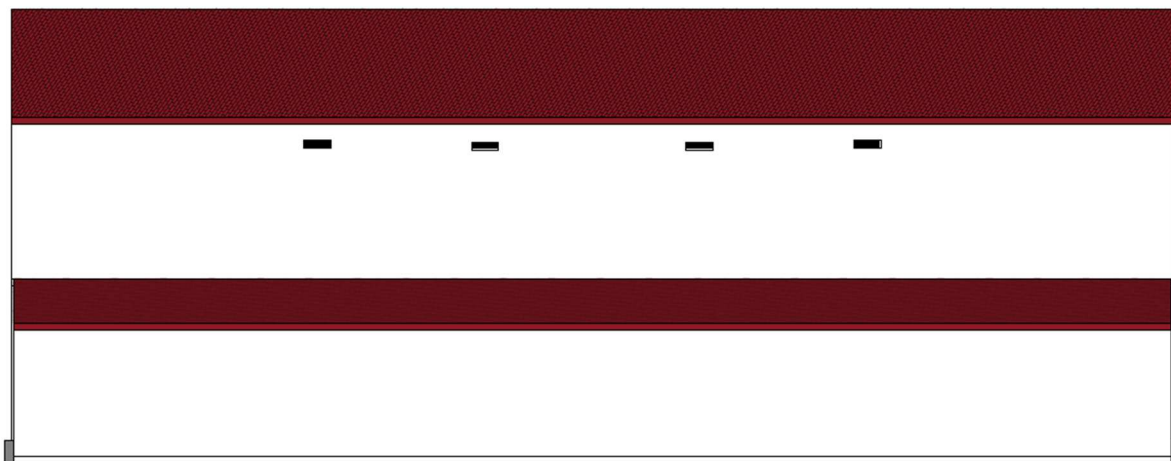
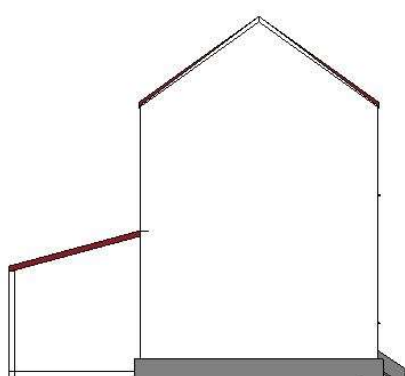
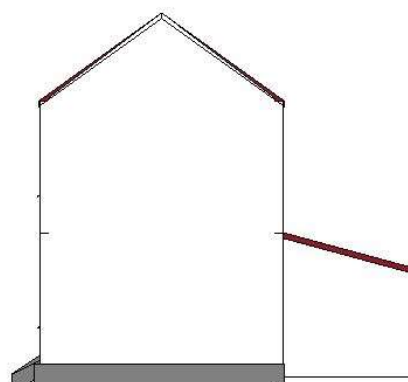


Figura 5.11 – Alçado principal (elaborado com recurso ao *software Revit*)

Figura 5.12- Alçado posterior (elaborado com recurso ao *software Revit*)Figura 5.13 – Alçado lateral esquerdo (elaborado com recurso ao *software Revit*)Figura 5.14 – Alçado lateral direito (elaborado com recurso ao *software Revit*)

Baseado num estudo anteriormente realizado numa escola do Plano dos Centenários [124], onde foram disponibilizadas informações do projeto que parecem adequar-se a esta escola, irá adotar-se, durante o presente estudo, essas informações sobre as características construtivas do edifício, pois foi efetuada simultaneamente uma inspeção visual que permite validar grande parte desta informação. Deste modo, definir-se-á que as paredes, serão em alvenaria de pedra de granito, estando rebocadas em ambos os lados com argamassa de areia e cimento, com 0,23 m de espessura. Relativamente ao embasamento, este terá a espessura de 0,53 m, sendo igualmente em granito aparelhado e desprovido de revestimento. Na cobertura, existirá uma esteira em laje aligeirada, com 0,15 m de espessura, rebocada na face inferior com argamassa de cimento e areia. As vertentes do telhado serão em vigotas pré-esforçadas, com ripado e revestimento a telha cerâmica de barro vermelho. Em relação ao pavimento (piso térreo), a sala de aula possui régua de madeira com 0,02m de espessura, apoiadas em vigamento em madeira de pinho de 0,18 x 0,09 m, espaçados 0,43 m e com caixa de ar de 0,30 a 0,50 m. Os vãos exteriores são compostos por uma caixilharia de alumínio de cor verde escura (em bom estado) e vidro duplo com 4 mm de espessura, havendo apenas uma proteção interior de cortinas claras em cada janela. Estes vãos exteriores não serão por isso, os originais.



Importa ainda referir que, na parede em contacto com o exterior, já existe instalada desde o pavimento e ao longo de todo o comprimento da parede, uma placa de isolamento feita de desperdícios de couro com 1 m de altura e 3,5 cm de espessura (Figura 5.15).



Figura 5.15 – Placa de isolamento inserida na sala de aula [125]

No Plano dos Centenários, as salas foram construídas a partir de uma sala célula, o que permite que, neste trabalho, apenas se estude uma sala, cujas medidas a implementar podem, no futuro, ser reproduzidas nas restantes salas do mesmo edifício e/ou em edifícios escolares do mesmo tipo.

## 5.2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

Após a primeira visita à escola e depois de analisar as condições em que a sala se encontrava, procedeu-se a um levantamento das medidas que poderiam ser adotadas, a fim de melhorar o desempenho térmico da sala de aula. Importa referir que não foi autorizado qualquer tipo de intervenção com soluções permanentes, pelo que as melhorias a efetuar apenas poderiam permanecer durante o período em estudo. Deste modo, e após a análise das principais falhas térmicas da sala, optou-se por uma intervenção apenas na parede em contacto com o exterior e na porta, através da utilização de materiais de desperdício. De forma a avaliar o desempenho térmico inicial da sala de aula, colocaram-se no interior três sensores que mediriam, de 30 em 30 minutos a temperatura da sala e a humidade relativa (HR) antes e após a intervenção. Foi ainda colocado no exterior um sensor igual aos restantes, que registaria a temperatura e HR do exterior.

Os sensores utilizados foram os que se encontram representados na Figura 5.16, tendo as seguintes especificações [126]:

### Sensor de temperatura:

Intervalo: -20°C a 70°C

Precisão:  $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$  de 0°C a 50°C

Resolução: 0,024°C a 25°C

Tempo de resposta: 4 minutos no ar em movimento 1 m/s (2,2 mph)

Desvio:  $< 0,1^{\circ}\text{C}$  por ano

### Sensor de humidade relativa:

Intervalo: 1% a 95% (sem condensação)

Precisão:  $\pm 2,5\%$  de 10% a 90% típico até máximo de  $\pm 3,5\%$  incluindo histerese a 25°C

Resolução: 0,05%

Tempo de resposta: 11 segundos a 90% no fluxo de ar de 1 m/s (2,2 mph)

Desvio:  $< 0,1^{\circ}\text{C}$  por ano



Figura 5.16 – Sensor utilizado (Hobo Temp/RH 2,5% Data Logger) [127]

Para a melhoria do desempenho da envolvente exterior, optou-se por aplicar um material de desperdício que tivesse apresentado boas características térmicas, a fim de estudar o seu comportamento. Uma vez que teria de ser preenchida a zona da parede onde não houvesse a placa apresentada na Figura 5.15, precisar-se-ia de material em grandes quantidades, condicionando bastante as opções. Além disso, como a solução adotada teria de ser fixada de modo provisório na parede, rapidamente se percebeu que o material deveria ser bastante leve, de modo a ser mais fácil de implementar e sustentar-se durante o trabalho realizado. Em relação à porta de escola, apenas se decidiu utilizar algum material de desperdício que permitisse tapar a grande fissura visível na Figura 5.8, uma vez que, desta forma, se eliminaria uma fonte de entrada de ar frio. Após a análise do desempenho térmico inicial, definiu-se o material a utilizar e a quantidade, tendo sido implementadas as medidas propostas. Posto isto, os sensores continuaram a fazer medições durante um mês após a implementação.

Paralelamente a este processo, e tendo necessidade de quantificar o valor do coeficiente de condutibilidade térmica do material de desperdício a utilizar na parede, de modo a avaliar as necessidades nominais de energia útil para aquecimento, realizou-se um ensaio de condutibilidade térmica em laboratório, através do equipamento “CT-Mètre” (Figura 5.17). Este equipamento é constituído por duas partes [128]:

- Unidade de controlo: gera a potência para o aquecimento da amostra e analisa a curva de variação da temperatura induzida neste.
- Sonda: este elemento é constituído por uma resistência e um termopar do tipo J agrupados num único bloco. A sonda utilizada foi a sonda “Anneau” contruída com um filme multicamada cobre-poliamida-constantan. A resistência, construída em constantan, tem a forma circular e o termopar incluído na sonda é do tipo J (cobre/constantan). Esta sonda tem 0,3 mm de espessura.



Figura 5.17 – Equipamento “CT-Mètre” com sonda “Anneau”

De seguida apresentam-se algumas especificações importantes do equipamento “CT-Mètre” [128]:

- Método de medida: regime transitório
- Gama de medida: 0,02 a 5 W/m.K
- Gama de temperatura: -20°C a 80°C
- Precisão:  $\pm 2\%$
- Repetibilidade:  $\pm 1\%$
- Tempo de medida: 40 a 500s

Os provetes a utilizar com o “CT-Mètre”, com a sonda “Anneau”, devem obedecer às medidas mínimas especificadas na Tabela 5.1:

Tabela 5.1- Dimensões mínimas das amostras (adaptado de [128])

Sonda	Dimensões mínimas das amostras (Comprimento x Largura x Espessura)	
<b>Anneau</b>	$\lambda < 0,5 \text{ W/m.K}$	$\lambda > 0,5 \text{ W/m.K}$
	100x50x20	100x50x50

O princípio de funcionamento do equipamento baseia-se na colocação da sonda entre duas amostras e após o início do ensaio, o sistema de controlo inicia a sequência de testes que consistem na medição da temperatura a cada seis segundos, durante 60 segundos. O ciclo de aquecimento não pode começar se a variação da temperatura foi superior a  $\pm 3\%$  durante 60 segundos. Posto isto, o aquecimento começa quando verificado um período de temperatura constante e termina após um período predefinido (40 a 500 segundos). Durante o período de aquecimento, a temperatura é medida com uma periodicidade programável entre um a cinco segundos, com uma precisão  $\pm 0,03^\circ\text{C}$  [128].



### 5.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO INICIAL

#### 5.3.1. INTRODUÇÃO

Como anteriormente mencionado, de modo a avaliar o desempenho inicial da sala de aula, colocaram-se três sensores no interior da sala e um sensor no exterior, que permitiram medir a temperatura (interior e exterior) da sala. Este estudo tem como foco principal a estação de aquecimento, pois é a estação onde existe mais desconforto e a que exige mais cuidados.

Uma vez que a sala não está permanentemente a ser aquecida, pois neste momento a escola encontra-se desativada, não será possível avaliar o seu comportamento a 18°C, valor base de referência para efeitos de cálculo. No entanto, a colocação dos sensores permitirá, primeiramente avaliar a temperatura a que a sala se encontra, caso não seja aquecida e, posteriormente, através das visitas efetuadas à escola, em que a sala foi aquecida com aquecedores, tentar-se-á compreender a dissipação do calor ao longo do tempo.

Deste modo, em primeiro lugar definir-se-á a zona climática onde a escola está inserida e, em seguida, realizar-se-á o cálculo do valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento da sala ( $N_{ic}$ ). Comparar-se-á então o resultado com o valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento da sala ( $N_i$ ) a fim de verificar se a sala de aula cumpre termicamente os valores legislados, sendo que para isso,  $N_{ic} \leq N_i$ .

Posto isto, analisar-se-á graficamente os valores referentes aos dias em que a sala de aula foi aquecida antes da intervenção, para compreender o intervalo de tempo em que a parede armazena o calor e o intervalo de tempo em que este é libertado até a temperatura estabilizar novamente.

#### 5.3.2. ZONAMENTO CLIMÁTICO

A escola, onde se insere a sala em estudo, localiza-se na NUTS III do Ave, uma vez que pertence ao município de Guimarães. De acordo com o estabelecido no Despacho nº. 15793-F/2013 [17], concluiu-se que esta pertence à zona climática de inverno I2 e à zona climática de verão V2 (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Zonamento climático

NUT III	Município	$z_{ref}$ (m)	$z$ (m)	Zona Climática
Ave	Guimarães	426	202	I2, V2

GD		M		$\Theta_{ext,i}$		$\Theta_{ext,v}$	
$GD_{ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)	$M_{ref}$ (meses)	$a$ (mês/km)	$\Theta_{ext,i,ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)	$\Theta_{ext,v,ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)
1653	1500	7,2	0	7,8	-6	20,8	-3
1317		7,2		9,1		21,5	

Os graus-dias de aquecimento (base 18°C) caracterizam a severidade de um clima durante a estação de aquecimento. Este valor é obtido pelo somatório das diferenças positivas registadas entre uma dada temperatura de base (18°C) e a temperatura do ar exterior durante a estação de aquecimento. As diferenças são calculadas com base nos valores horários da temperatura do ar (termómetro seco). Neste caso, o número de graus-dias de aquecimento correspondente à estação convencional de aquecimento é igual a 1317°C.dias ( $GD=1653 + 1500 \times (0,202-0,426) = 1317^\circ\text{C.dias}$ ). A estação convencional de aquecimento é o período do ano com início no primeiro decêndio posterior a 1 de outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decêndio anterior

a 31 de maio em que a referida temperatura ainda é inferior a 15°C. A duração da estação de aquecimento para a zona em estudo é igual a 7,2 meses ( $M=7,2 + 0 (0,202-0,426)=7,2$  meses). A energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a Sul na estação de aquecimento ( $G_{sul}$ ) é de 125 kWh/m<sup>2</sup>.mês.

A estação de arrefecimento caracteriza-se por uma duração da estação ( $L_v$ ) igual a quatro meses (2928h), sendo a temperatura exterior média do ar para a zona em estudo igual a 21,5°C ( $\Theta_{ext,v}=20,8 + (-3) (0,202-0,426)=21,5^\circ\text{C}$ ). A energia solar acumulada durante a estação de arrefecimento, recebida na horizontal (inclinação de 0°) e em superfícies verticais (inclinação de 90°) para os quatro pontos cardeais e os quatro colaterais, é determinada pela consulta do Despacho n.º 15793-F/2013 [17], e uma vez que a escola se insere na NUTS III do Ave, a energia solar acumulada é a indicada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Energia solar acumulada para a estação de arrefecimento

NUTS III	$I_{sol}$ [kWh/m <sup>2</sup> ] acumulados de junho a setembro								
	Horiz.	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
<b>Ave</b>	795	220	350	490	490	425	490	490	350

### 5.3.3. VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO LEGISLATIVO

Antes de iniciar a avaliação do desempenho térmico da sala de aula, através da verificação legislativa, importa referir que o cálculo das necessidades nominais de energia útil para aquecimento, apenas foi efetuado para a sala em estudo e considerando as suas envolventes. Corretamente, este cálculo deveria ser aplicado ao edifício todo, pois a sala não é considerada uma fração autónoma. No entanto, face ao desconhecimento de todas as divisões da escola, assim como das suas áreas e materiais utilizados, e uma vez que as melhorias do desempenho térmico apenas foram aplicadas a uma divisão, esse cálculo não seria muito representativo. Assim, optou-se por proceder ao cálculo apenas da sala de aula, uma vez que se considera que os resultados obtidos, permitirão proceder a uma avaliação do desempenho térmico mais representativa e relevante.

Tendo presente a zona climática a que pertence a sala em estudo, é possível compreender os valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência dos elementos opacos e dos vãos envidraçados para os edifícios de comércio e serviço. Na Tabela 5.4 apresentam-se esses valores para a zona climática, I2, retirados da Portaria n.º349-D/2013 [15].

Tabela 5.4- Valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência dos elementos opacos e dos vãos envidraçados para os edifícios de comércio e serviço para a zona climática I2 [15]

Zona corrente da envolvente	Zona climática I2
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,60
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,45
Vãos envidraçados exteriores (Portas e janelas)	3,30

Posto isto, e através das fórmulas apresentadas no capítulo 2, é possível proceder ao cálculo do valor máximo para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, através dos valores de referência apresentados. Obtido esse valor, procede-se ao cálculo do valor real para as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, utilizando os valores reais, quer dos coeficientes de transmissão térmica superficiais dos elementos, quer dos valores reais do zonamento climático. Os cálculos realizados apresentam-se detalhadamente no Anexo A1, e importa referir algumas decisões tomadas durante o cálculo de ambos os valores ( $N_{ic}$  e  $N_i$ ).

Primeiramente, no cálculo do coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior, houve necessidade de separar em duas parcelas a parede exterior da sala, uma vez que a placa de isolamento interior, apenas se encontra aplicada em 8 m<sup>2</sup> da parede exterior. Além disso, pelo desconhecimento do valor de condutibilidade térmica da placa de couro, assumiu-se que esse valor seria igual a 0,060 W/m.°C pois, pela comparação de materiais e valores expostos em [20], será o valor que melhor se ajusta. Os vãos envidraçados, apesar de apenas serem três, têm, cada um deles, uma área que se encontra fixa e uma área de correr, o que altera os valores de  $U_w$ , justificando assim a divisão em parcelas. Em relação às pontes térmicas lineares existentes na envolvente exterior, apenas a ponte térmica linear fachada com pavimento térreo, foi retirada do Despacho n.º 15793-K/2013[4], pois é a única onde existe isolamento térmico na parede pelo interior (relativa à PE2). Como para as restantes pontes térmicas lineares não existem valores para coeficientes de transmissão térmica lineares para paredes sem isolamento térmico, utilizaram-se os valores definidos pelo Despacho n.º 15793-E/2013 [129]. Os valores apresentados neste Despacho devem ser utilizados nas situações em que se verifique impossibilidade ou limitação no acesso a melhor informação. Relativamente às pontes térmicas planas, uma vez que não é possível identificá-las e caracterizá-las, majorou-se o valor do coeficiente de transmissão térmica das paredes exteriores em 35%, de acordo com o exposto na Portaria n.º 349-D/2013 [15] a fim de as contabilizar.

No cálculo dos coeficientes de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não úteis, definiu-se como espaços não úteis, o átrio da escola e o miniginásio, uma vez que são espaços não aquecidos. O  $U_{real}$  apresentado para a porta, foi definido considerando o estado de desgaste desta, visível na Figura 5.8. O valor do  $b_{tr}$  foi obtido considerando que os espaços não úteis têm todas as ligações entre elementos bem vedadas, sem aberturas de ventilação permanentemente abertas.

No cálculo dos elementos em contacto com o solo, face ao desconhecimento da informação de projeto, será adotado um pavimento semelhante ao que se encontra representado na Figura 5.18. Como não existem certezas dos materiais em contacto com o solo, o valor do  $U_{bf}$  foi retirado da Tabela 02 do Despacho n.º 15793-E/2013 [129], assumindo que  $z < 1$  m e que  $R_f < 0,75$  W/(m<sup>2</sup>.°C).

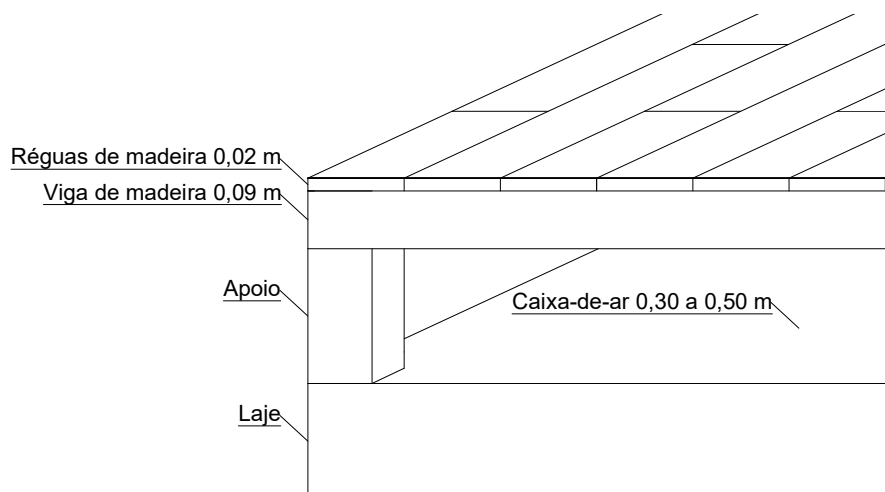


Figura 5.18 - Representação do pavimento

Em relação às perdas de calor por ventilação, no cálculo do  $R_{ph}$  de referência, o caudal mínimo admitido foi  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ , uma vez que a Portaria n.º 353-A/2013 [8] prevê que em salas de aula, o valor de caudal de ar novo seja  $24 \text{ m}^3/(\text{hora.pessoa})$ . Ora, sendo que no ensino básico, as turmas do 1.º ciclo são constituídas por 24 alunos, segundo o Despacho normativo n.º 1-B/2017 [130], e existindo ainda um professor na sala de aula, perfaz  $24 \text{ m}^3/(\text{hora.pessoa})$  para 25 pessoas =  $600 \text{ m}^3/\text{h}$ . Em relação ao valor de  $R_{ph}$  existente na sala de aula, esse valor foi estimado recorrendo à folha de cálculo “Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS” [131] e admitindo a existência de aberturas de admissão de ar na envolvente, fixas com uma área livre de  $1544 \text{ cm}^2$ . Este valor obteve-se considerando  $672 \text{ cm}^2$  de cada uma das grelhas de ventilação, onde acresce  $200 \text{ cm}^2$  que representam a fissura existente na porta de entrada da sala, assumindo que essa abertura se faz ao longo de 1 m de largura da porta e 0,02 m de altura. A folha de cálculo referente à estimativa do valor de  $R_{ph}$  inicial real poderá ser consultada no Anexo A2.

Como anteriormente referido no capítulo 2, para o cálculo dos ganhos térmicos internos, o valor dos ganhos internos médios para a sala de aula ( $q_{int}$ ) contabilizou-se  $7 \text{ W/m}^2$ , uma vez que é o valor estabelecido pelo anterior regulamento [14]. Em relação aos vãos envidraçados, todos se encontram na direção Este, tendo sido considerado o valor de  $F_o.F_f$  igual a 0,90 de modo a contabilizar o efeito provocado pelo contorno do vão, uma vez este não se situa à face exterior da parede. Todas as janelas apresentam quadrículas e o fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão,  $g_{\perp,vi}$ , foi definido para um vidro duplo incolor 4 mm + 4 mm.

Para o cálculo da inércia térmica, primeiramente identificaram-se os elementos construtivos conforme as Figuras 5.19 e 5.20. Importa referir que o pavimento intermédio e a parede interior em contacto com a outra sala de aula do mesmo piso, caso se procedesse ao cálculo da inércia térmica do edifício, deveriam ser EL3. No entanto, uma vez que se está a considerar a sala de aula como uma fração autónoma, assumiu-se que esses elementos eram EL1, pois foram definidos como elementos em contacto com outra fração autónoma. Os valores do  $M_{si}$  e de  $r$  foram determinados segundo o definido pelo Despacho n.º 15793-K/2013 [4]. A massa total dos elementos encontra-se detalhada na Tabela 5.5.

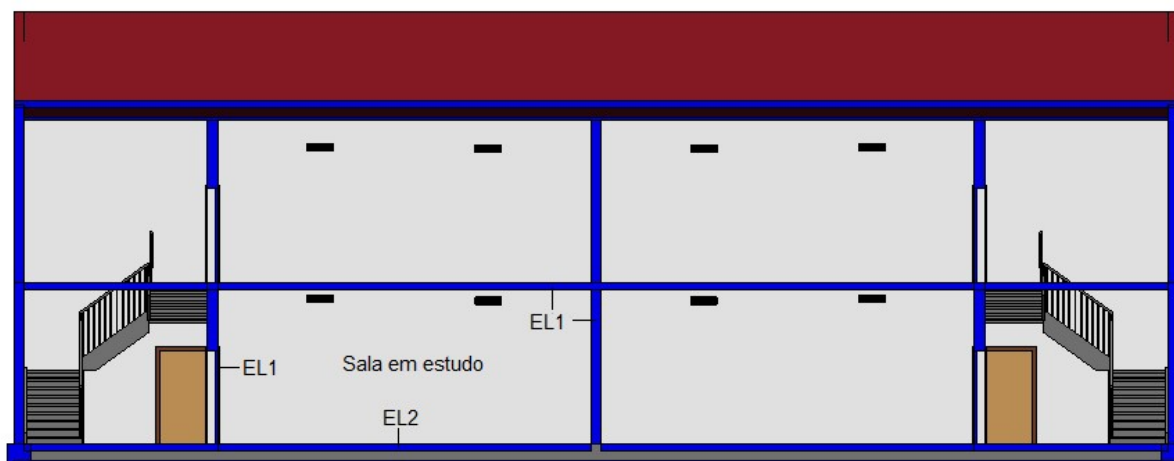


Figura 5.19 – Identificação dos elementos construtivos – Corte do alçado principal (elaborado com recurso ao software Revit)

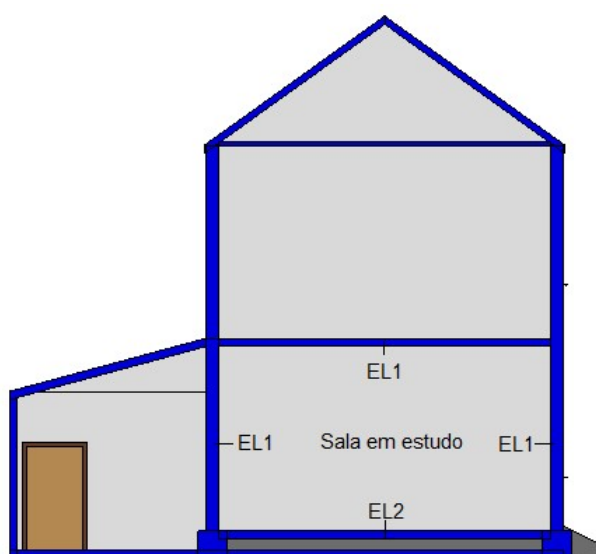


Figura 5.20- Identificação dos elementos construtivos – Corte do alçado lateral esquerdo (elaborado com recurso ao software Revit)

Tabela 5.5 – Massa total dos elementos construtivos

Massa dos elementos construtivos	Massa volúmica [kg/m³]	e [m]	Mt [kg/m²]
Reboco tradicional	1900	0,020	38,00
		0,025	47,50
Granito	2600	0,230	598,00
Placa de Couro	714	0,035	25,00
Laje aligeirada	1500	0,150	225,00
Soalho	800	0,020	16,00

Pelos valores obtidos, e visíveis na Tabela 5.6, constata-se que a sala em estudo cumpre a condição  $N_{ic} \leq N_i$ . No entanto, é preciso analisar os resultados com sentido crítico e compreender os valores obtidos. Em relação ao valor de  $N_{ic}$ , primeiramente, o que se verifica é que tanto a parede em contacto com o exterior, PE1, como as duas paredes em contacto com espaços não aquecidos, PI1 e PI2, possuem valores de coeficientes de transmissão térmica dos elementos opacos,  $U$ , superiores aos valores máximos admissíveis, havendo, desta forma maiores perdas de calor por transmissão através da envolvente. Além disso, o facto do valor das renovações de ar novo ser bastante inferior ao exigido, permite diminuir o valor das perdas de calor por ventilação. Acresce ainda o facto de a sala de aula possuir vãos envidraçados de dimensões consideráveis, o que significa que existem ganhos solares apreciáveis. No valor do  $N_i$  é considerado o valor de renovações de ar novo mínimas exigidas em sala de aula, que é bastante superior ao existente e que se reflete em perdas de calor por ventilação bastante superiores. Assim, podemos concluir que, apesar da condição  $N_{ic} \leq N_i$  se verificar, tal só acontece devido ao não cumprimento de requisitos regulamentares.

Apesar disso, neste trabalho, será apenas estudado o efeito das melhorias térmicas de alguns elementos, com materiais de desperdício, de forma provisória, não sendo, portanto, possível realizar nenhuma intervenção ao nível da ventilação, apesar desse valor condicionar sempre o valor de cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento.

Tabela 5.6- Valores obtidos no cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento na sala de aula

<b><math>N_{ic}</math> [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	<b><math>N_i</math> [kWh/m<sup>2</sup>.ano]</b>	<b><math>N_{ic} \leq N_i</math></b>
143,35	262,77	Verifica

#### 5.3.4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

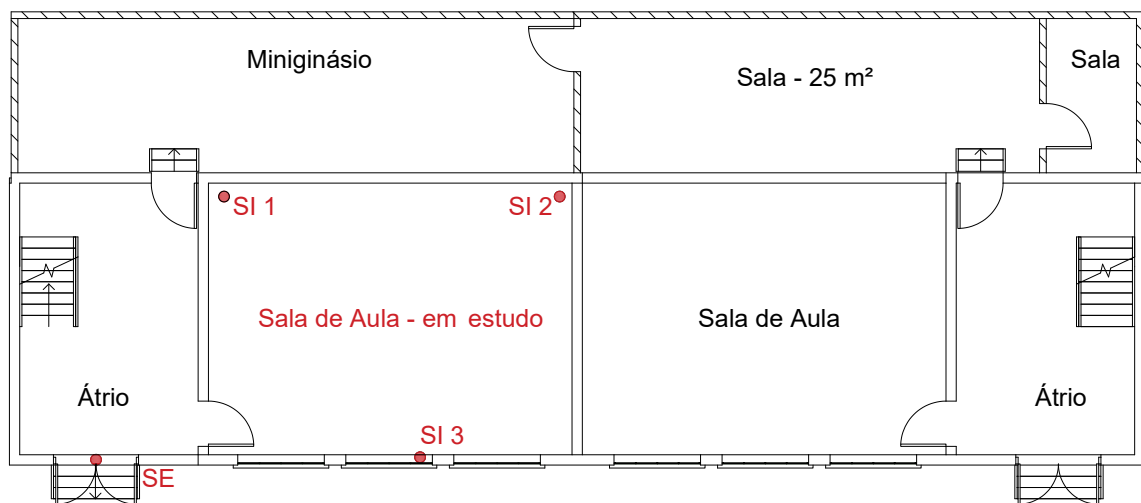
Como anteriormente foi referido, os resultados obtidos não permitirão avaliar o comportamento da sala à temperatura base de referência para efeitos de cálculos (18°C). No entanto, através da análise gráfica dos resultados obtidos, tentar-se-á perceber a ordem de valor a que a sala se encontra quando não está aquecida, assim como avaliar o tempo de dissipação do calor, quando a sala é aquecida.

Antes de iniciar a análise, importa referir que, sendo a escola em Guimarães, e não havendo atividade na escola, os dias em que a sala foi aquecida correspondem aos dias de reconhecimento do espaço e de preparação das propostas implementadas. Deste modo, e uma vez que a temperatura da sala é bastante baixa, devido à forte inércia da sala, nunca foi possível obter valores de temperatura elevados durante o aquecimento. Apesar disso, como veremos de seguida, notar-se-á graficamente esse aquecimento. Importa ainda advertir para o facto de a temperatura exterior exibir valores elevados perto das 11h/12h. Tal é explicado pelo facto de o sensor ter sido colocado perto de um vidro e protegido pela parte de baixo de uma garrafa de plástico e essa hora coincidir com a hora em que o sol batia nos vidros ou sensor (Figura 5.21).



Figura 5.21- Localização do sensor exterior

O estudo iniciou-se a 6 de fevereiro, sendo esse o dia em que os sensores foram colocados e distribuídos conforme a Figura 5.22. A sala não foi aquecida nesse dia, uma vez que depois de colocados, os sensores precisam de estabilizar a sua temperatura,. No entanto, analisando os valores da temperatura da sala no dia seguinte, 7 de fevereiro, verifica-se uma temperatura média interior igual a 7,66°C, verificando-se, no exterior, uma temperatura média de 7,15°C. Ora, considerando que a temperatura interior de conforto para a estação de aquecimento deveria situar-se nos 18°C, com aquecimento, facilmente se conclui que a temperatura obtida não é de todo aceitável, pois não se pretende que um edifício tenha, no seu interior, a mesma temperatura que o exterior, mesmo considerando que não há aquecimento.



### Planta Rés-do-Chão

SI- Sensor interior

SE- Sensor exterior

Figura 5.22 – Posição inicial dos sensores (elaborado com recurso ao *software Revit*)

Antes de proceder à intervenção, realizaram-se duas visitas à escola, onde foi possível aquecer a sala de aula para verificar o efeito da dissipação do calor ao longo do tempo.

No primeiro dia, dia 7 de março, o sensor junto à janela, SI3 encontrava-se desligado, sendo que a análise abaixo apresentada (Figura 5.23) apenas foi realizada com o sensor SI1 e SI2. No gráfico seguinte, é possível verificar que a temperatura interior da sala de aula na manhã de dia 7 de março encontrava-se abaixo dos 10°C e, no momento em que se iniciou o aquecimento da sala, o valor exato registado foi de 9,73°C. Durante essa tarde, entre as 15h30 e as 18h00, estiveram ligados três aquecedores dentro da sala, tendo a porta da sala de aula estado fechada, a maior parte do tempo, conseguindo-se obter uma temperatura máxima de 13,04°C. Pela análise do gráfico, é possível verificar que, após as 18h00, a temperatura da sala estabilizou durante madrugada do dia 8 de março, tendo mantido uma temperatura constante a partir das 04h00 desse dia. Ou seja, o calor que estava na sala de aula, dissipou-se em cerca de dez horas, o que demonstra que as paredes não conseguiram absorver o calor durante mais tempo.

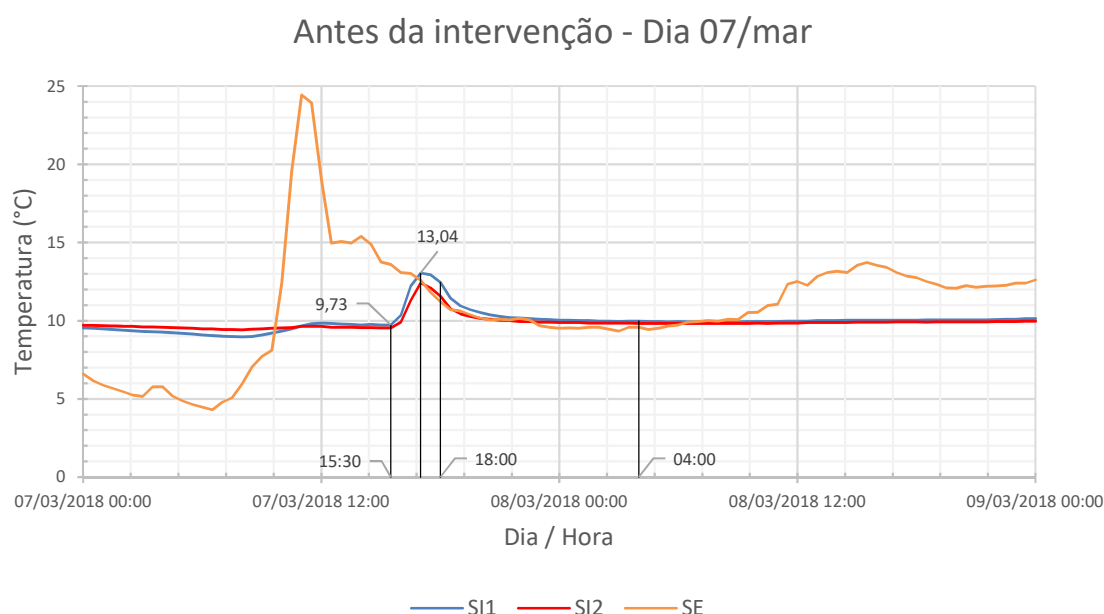


Figura 5.23- Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 7 de março

No dia 12 de março (Figura 5.24), no interior da sala de aula, apenas estava a funcionar o sensor SI1. Nesse dia, a temperatura da sala, antes de realizar o aquecimento, encontrava-se na ordem dos 11°C, estando no momento antes de se iniciar o aquecimento a uma temperatura de 11,59°C. O período de aquecimento foi realizado entre as 15h30 e as 18h30, conseguindo-se obter um valor máximo da temperatura interior de 13,60°C. Dado que o período de aquecimento da sala foi semelhante nos dois dias e, uma vez que a temperatura da sala no dia 12 de março, antes do aquecimento, era superior à temperatura inicial do dia 7 de março, a temperatura máxima da sala, expectavelmente, deveria ter atingido um valor um pouco superior. No entanto, tal pode ser justificado pelo facto de, no dia 7 de março, estarem cerca de 20 pessoas dentro da sala, a preparar a intervenção proposta, enquanto que no dia 12 de março, apenas se encontravam quatro pessoas. Como é sabido, o número de pessoas presentes representa um ganho de calor acrescido. À semelhança do que aconteceu no dia 7 de março, após os aquecedores terem sido desligados, a temperatura da sala estabilizou durante a madrugada seguinte, tendo-se mantido constante a partir das 04h30 do dia 13 de março e representando, mais uma vez, uma dissipação total do calor em cerca de dez horas.



Importa ainda referir que a temperatura foi considerada estável, quando às 04h30 de dois dias consecutivos não se registou descida da temperatura. A escolha dessa hora tem a ver com o facto de representar, na análise dos dados obtidos pelo sensor, a hora a que se iniciava um período onde a temperatura se mantinha igual durante cerca de três horas, sem oscilações, pois nessa hora não há nenhuma oscilação de temperatura exterior que influencie o interior. Assim, sempre que for considerada estável a temperatura depois do aquecimento, num determinado dia, significa que no dia seguinte, às 04h30 deixou de haver uma descida da temperatura.

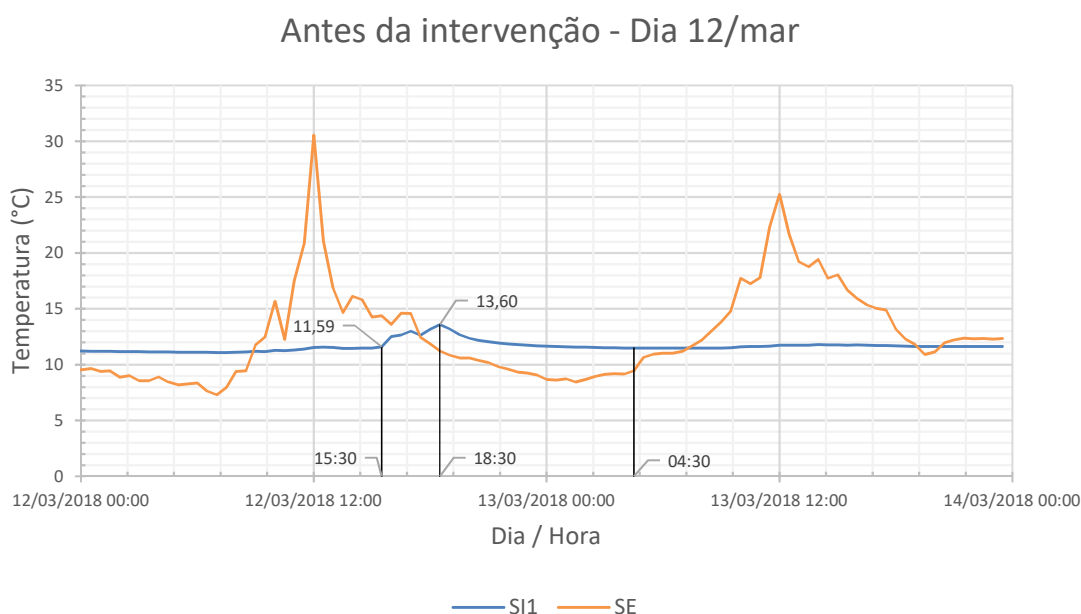


Figura 5.24- Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 12 de março

Pela avaliação efetuada, é possível compreender que o desempenho térmico inicial da sala de aula é bastante baixo, uma vez que sem aquecimento, a sala atinge valores na ordem dos 7°C durante a estação de aquecimento. Além disso, pela análise gráfica, é possível compreender que a inércia térmica da sala de aula é forte, pois, para além de, em três horas, a temperatura interior ter subido pouco na sala de aula, nos dias em que foi aquecida, esse calor foi dissipado em dez horas. Verifica-se ainda, que a inércia térmica desta sala de aula é responsável pela fraca oscilação da temperatura interior da fonte de ganhos térmicos. Este fenómeno acaba por ser prejudicial em edifícios escolares, pois o perfil de ocupação destes edifícios é temporário, e pretende-se que o aquecimento seja rápido, o que não acontece, dado que a inércia forte retarda o aumento da temperatura ambiente.

Assim, conclui-se que é necessário intervir na envolvente exterior, uma vez que é a envolvente onde se dão maiores trocas de calor. É pois necessário encontrar uma solução que funcione como isolamento térmico interior e que permita diminuir a perda térmica para o exterior, de modo a que a dissipação do calor se dê por um período maior. Desta forma, também se conseguem reduzir as necessidades de aquecimento da sala. Além disso, o estado de degradação da porta da sala e a fissura profunda que esta apresenta, contribuem para a dissipação de calor da sala, representando, deste modo, também um elemento onde é necessário intervir.

## 5.4. PROPOSTA DE MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO

### 5.4.1. AVALIAÇÃO DO MATERIAL DE DESPERDÍCIO

Uma vez não foi permitido proceder a uma intervenção definitiva na sala em estudo, as soluções adotadas teriam de ser concebidas de forma provisória nos elementos a intervencionar. Além disso, decidiu-se que se utilizaria um material de desperdício que seria aplicado em cerca de 11m<sup>2</sup> na parede em contacto com o exterior, pelo que este material deveria ser preferencialmente leve, de modo a não haver muita compactação devido ao seu peso e que teria de ser obtido em grandes quantidades. Deste modo, decidiu-se utilizar apenas um material para cada um dos elementos a intervencionar, uma vez que a condicionante de tempo de monitorização a efetuar não permitiria que se testassem outros materiais.

A procura de materiais de desperdício com potencialidades térmicas, iniciou-se com pesquisa intensiva dos materiais de desperdício até então estudados termicamente e anteriormente expostos no capítulo 3. Desta forma, foi possível compreender os vários tipos de materiais de desperdício que teriam potencialidades a nível térmico provenientes de diferentes indústrias. Após este estudo, optou-se por excluir materiais orgânicos pois, apesar das potencialidades térmicas encontradas, não teriam grande aplicabilidade dado que se degradariam.

Posto isto, iniciou-se um estudo do mercado português a fim de compreender os diferentes tipos de indústrias existentes e as quantidades e tipos de desperdício produzidas. Das indústrias existentes em Portugal, as mais relevantes a analisar seriam:

- Indústria do calçado;
- Indústria corticeira;
- Indústria do couro;
- Indústria do mobiliário e colchões;
- Indústria do papel;
- Indústria têxtil e do vestuário;
- Indústria de reciclagens.

Relativamente à indústria do calçado, existe uma quantidade de materiais de desperdício com potencial de isolamento térmico, nomeadamente, as solas dos sapatos, as peles e couros utilizados e ainda os tecidos sintéticos. Todos estes materiais representam diariamente uma elevada quantidade de resíduos nas empresas, que não são reaproveitados. Deste modo, e face à elevada quantidade de empresas existentes, principalmente na região Norte, qualquer um destes materiais seria uma ótima solução para a aplicação na parede em estudo.

É sabido que a indústria corticeira, atualmente, produz isolamentos térmicos de cortiça, uma vez que este é um material isolante termicamente. No entanto, através da pesquisa do mercado, compreendeu-se que, hoje em dia, todos os desperdícios da indústria da cortiça são aproveitados. Por isso, pensou-se que as rolas de cortiça das garrafas utilizadas poderia ser uma opção, uma vez que depois de utilizadas não são reaproveitadas, no entanto, e face à elevada quantidade de rolas que seriam necessárias, facilmente se percebeu que não seria uma opção concretizável.

À semelhança do que acontece na indústria do calçado, a indústria do couro apresenta, diariamente, elevados resíduos inerentes à sua fabricação. Como anteriormente referido, atualmente existe uma empresa portuguesa que produz placas de isolamento com desperdícios de couro, havendo inclusivamente uma que se encontra aplicada na parede em estudo. Deste modo, a aplicação de desperdícios de couro é uma solução a ponderar, uma vez que, além das suas potencialidades, são facilmente obtidos em quantidade.

Em relação à indústria do mobiliário e colchões, apesar de já existir um estudo realizado com serrim [96], e dos resultados obtidos terem sido satisfatórios, esta solução foi excluída, por não ser fácil a sua aplicação de forma temporária na parede, além de serem necessárias grandes quantidades. No que diz respeito aos desperdícios de colchões, estes revelaram-se interessantes, uma vez que são materiais fibrosos e com propriedades térmicas, podendo facilmente ser aplicados na parede. No que diz respeito aos enchimentos de colchões, a sua obtenção em grandes quantidades poderá não ser fácil, uma vez que é um produto que poderá ser sempre inserido no colchão.

Na indústria do papel e das embalagens, não existem propriamente desperdícios que pudessem ser utilizados. No entanto, os produtos produzidos por esta indústria e utilizados diariamente representam uma elevada quantidade de material desperdiçado, apesar de existirem empresas que se dedicam à reciclagem do papel. Pela avaliação do mercado português, percebeu-se que, em Portugal existem, pelo menos, duas empresas que produzem isolamentos térmicos através da reciclagem de jornais e que oferecem valores de condutibilidade térmica baixos. Deste modo, e uma vez que é fácil obter papel que já não é utilizado, e visto que a celulose apresenta potencialidades a nível térmico, ponderou-se a sua utilização. Além do papel (jornais ou revistas), compreendeu-se que muitas empresas que lidam diariamente com a receção e/ou envio de materiais, usam bastante cartão nas embalagens, sendo que muito dele é desperdiçado depois de utilizar. Deste modo, o cartão poderia também representar uma boa solução, uma vez que estudos realizados demonstram que é um material que é aceitável em termos térmicos.

Os têxteis e o vestuário são os produtos que aparentemente melhor se comportam termicamente e é fácil de compreender, que analogamente à sua função de proteger o corpo humano das diferentes temperaturas, também poderão proteger o edifício em termos térmicos. Existem variados têxteis que podem ser encontrados nas empresas portuguesas, desde restos de tecidos obtidos dos cortes, mais ou menos fibrosos, ou outros resíduos têxteis. Em Portugal existem várias empresas onde se pode obter esses desperdícios, e em elevadas quantidades, podendo ser uma ótima solução para aplicar na parede.

Atualmente, começam a surgir imensas empresas ligadas à indústria da reciclagem, dada a necessidade de reaproveitamento de materiais, como é o caso das empresas que se dedicam ao fabrico de isolamento térmico com papel reciclado, já referidas anteriormente. É, pois, importante que se potenciem novos estudos relativos a possíveis usos dos materiais reciclados, contribuindo para um uso cíclico dos mesmos. Por esse motivo, realizou-se uma pesquisa onde se pretendeu saber que outras empresas, para além destas, se dedicam à reciclagem de produtos e posterior investigação da utilização dada a esses materiais. Assim, foi possível encontrar uma empresa dedicada à reciclagem de pneus que utiliza os desperdícios em diferentes granulometrias para integrar diversas soluções desde pistas de atletismo, pavimentos de parques infantis, superfícies absorvedoras de impacto, solas para sapatos, misturas betuminosas, isolamento acústico, entre outros. Percebeu-se que, de todos os processos inerentes à reciclagem dos pneus, existia apenas um material que não era aproveitado. Deste modo, e após visita à empresa, avaliação do material e das quantidades disponíveis, decidiu proceder-se à sua aplicação na parede da sala em estudo, considerando as potencialidades no mesmo: possuir fibras têxteis e borracha e ser um material aparentemente mais leve que os resíduos têxteis. Além disso, este material suscitou interesse por ser inovador, ainda não ter sido estudado a nível térmico e pertencer a uma indústria preocupada com a sustentabilidade e o aproveitamento de materiais em fim de vida.

#### 5.4.2. MATERIAL DE DESPERDÍCIO PROPOSTO

O material de desperdício escolhido, para aplicar na parede da envolvente exterior da sala de aula, é um subproduto da reciclagem de pneus, sendo o único componente da reciclagem que até agora não apresenta nenhum tipo de reaproveitamento. Deste modo, e uma vez que o material tem uma textura fibrosa, tendo na sua constituição borracha, fibras têxteis e outros inertes que apresentam propriedades térmicas interessantes, decidiu-se estudar este material a fim de compreender as suas potencialidades (Figura 5.28).



Figura 5.25 – Material de desperdício utilizado no estudo

Visto nunca terem sido realizados ensaios ao material, surgiu a necessidade de obter o valor de condutibilidade térmica do mesmo, a fim de quantificar as necessidades de energia útil para aquecimento da sala após a intervenção. Desta forma, e como anteriormente foi explicado, utilizou-se o equipamento “CT-Mètre” com a sonda “Anneau”, tendo sido preparadas seis amostras do material, de modo a conseguir obter valores de condutibilidade térmica de três ensaios diferentes, uma vez que em cada ensaio são utilizadas duas amostras.

Primeiramente, foi necessário secar o material em estufa, tendo para isso sido colocado material em seis tabuleiros metálicos que foram pesados previamente. Posto isto, procedeu-se a uma pesagem diária dos tabuleiros, até estes obterem uma pesagem constante (Tabela 5.7). Ao fim do quarto dia verificou-se que o material estava seco e estavam reunidas condições para iniciar o ensaio.

Tabela 5.7 – Pesagens iniciais para verificação do estado seco do material

	Peso [g]			
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4
<b>1</b>	1433	1420	1421	1421
<b>2</b>	1418	1406	1406	1406
<b>3</b>	1428	1414	1415	1415
<b>4</b>	1383	1373	1372	1372
<b>5</b>	1462	1448	1488	1448
<b>6</b>	1424	1412	1411	1411

Para a realização do ensaio foram elaborados seis moldes de cartão com as dimensões 0,16 x 0,12 x 0,05 m onde o material foi colocado e envolvido com película aderente. Uma vez que se pretendia obter a massa volúmica do material, os moldes e a película aderente a utilizar foram pesados previamente, sem material e posteriormente com o material que seria ensaiado (Figura 5.29 e 5.30).



Figura 5.26 – Moldes de cartão com película aderente



Figura 5.27 - Molde de cartão com película aderente e material (amostras a ensaiar)

Sabendo o peso do cartão com a película aderente, antes e após o enchimento com o material, pela diferença obtida, é possível calcular o valor do peso do material. Tendo as medidas do molde onde foi colocado o material, é possível obter o volume onde se insere e, desta forma, calcular o valor da massa volúmica do material de desperdício (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 – Massa volúmica das amostras

	Peso [kg]			Volume [m³]	Massa volúmica [kg/m³]	Massa volúmica média para as amostras ensaiadas [kg/m³]
	Molde de cartão com película aderente	Molde de cartão com película aderente e material	Material			
<b>1</b>	0,02723	0,22325	0,19602	0,00096	204,18	207,59
<b>2</b>	0,02700	0,22956	0,20256	0,00096	211,00	
<b>3</b>	0,02831	0,22750	0,19919	0,00096	207,49	209,79
<b>4</b>	0,03040	0,23401	0,20361	0,00096	212,09	
<b>5</b>	0,03034	0,23392	0,20368	0,00096	212,16	208,75
<b>6</b>	0,02770	0,22482	0,19712	0,00096	205,33	
					<b>Média</b>	<b>208,71</b>

Obtidos os valores médios da massa volúmica das amostras, iniciou-se o ensaio de condutibilidade térmica. Realizaram-se três ensaios e em cada um deles obtiveram-se três medições de modo a alcançar um valor médio de condutibilidade térmica mais próximo da realidade. Os ensaios consistiram na medição do valor da condutibilidade térmica entre as amostras 1-2, 3-4 e 5-6, estando os valores obtidos sintetizados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Valores de condutibilidade térmica obtidos

	$\lambda$ [W/m.K]	$\lambda$ médio [W/m.K]
<b>1-2</b>	0,075	0,076
	0,075	
	0,077	
<b>3-4</b>	0,070	0,070
	0,070	
	0,070	
<b>5-6</b>	0,083	0,083
	0,085	
	0,081	
<b>Média</b>		<b>0,076</b>

Desta forma, e pelos resultados obtidos, é possível compreender que o valor da condutibilidade térmica do material é cerca de 0,076 W/m.K para uma massa volúmica de 208,7 kg/m<sup>3</sup>. Apesar de o valor de  $\lambda$  ter sido satisfatório, o valor da massa volúmica é um pouco superior ao esperado, uma vez que o material possui uma elevada quantidade de sedimentos finos na sua composição pois encontram-se misturados com a parte fibrosa do material, e apenas se detetam quando há um manuseamento de grandes quantidades. Apesar disso, uma vez que é um material que se encontra sem adição de nenhum ligante, quando comparado com os valores de referência estabelecidos por [20] para isolantes térmicos em grânulos leves ou fibras soltas (sem ligante) (Tabela 5.10), é possível compreender que, para a massa volúmica do material de desperdício, o valor da condutibilidade térmica é bastante satisfatório, estando entre os valores de referência.

Tabela 5.10 – Valores de referência para isolantes térmicos [20]

<b>Material</b>	<b>Massa volúmica aparente seca, <math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>Condutibilidade térmica, valor de cálculo, <math>\lambda</math> [W/(m.°C)]</b>
<b>Grânulos leves ou fibras soltas (sem ligante)</b>		
<b>Grânulos de argila, de vermiculite ou de perlite expandidas</b>	< 400	0,16
<b>Outros tipos de grânulos leves ou fibras soltas</b>	20-100	0,060

#### 5.4.3. IMPLEMENTAÇÃO DA PROPOSTA

Numa primeira fase, pretendia-se que a intervenção não compromettesse o aspeto da sala de aula no final do estudo. Deste modo, procedeu-se a um estudo dos materiais que poderiam ser utilizados para aguentar o material de desperdício junto da parede de forma provisória durante, sensivelmente, um mês. Depois de uma pesquisa dos materiais existentes no mercado que poderiam auxiliar a fixação do material de desperdício na parede, compreendeu-se que a forma que estragaria menos o aspeto da sala, seria através da fixação com cola de montagem, que hoje em dia, tem aderência inicial extremamente elevada e capacidade de aguentar elevadas cargas por metro quadrado. Assim, procurou-se encontrar uma solução que permitisse fixar o material de desperdício através de cola, não diretamente. Deste modo, realizaram-se pequenos testes com o objetivo de perceber se seria possível, através da criação de pontos de ancoragem, aguentar o peso do material, que se revelaram positivos. Procedeu-se então à elaboração da solução, que consistiu na criação de uma matriz de pontos de ancoragem, realizada através de “espanta pássaros” de plástico (Figura 5.31), onde, posteriormente à sua colagem, o material seria encostado à parede e fixo com uma tela para solo (Figura 5.32).



Figura 5.28 – Pontos de ancoragem



Figura 5.29 – Tela para solo

De seguida, apresenta-se a matriz de pontos de ancoragem proposta (Figura 5.33), assim como um corte esquemático elucidativo da colocação do material de desperdício e da tela para solo (Figura 5.34).

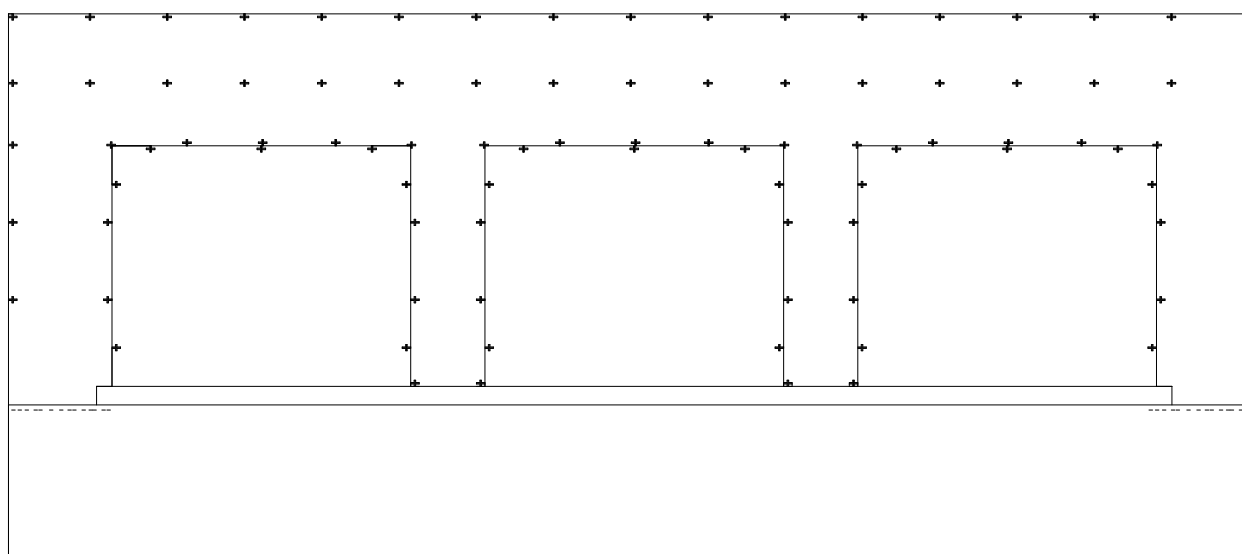


Figura 5.30 – Matriz de pontos de ancoragem (elaborado com recurso ao *software* AutoCAD)



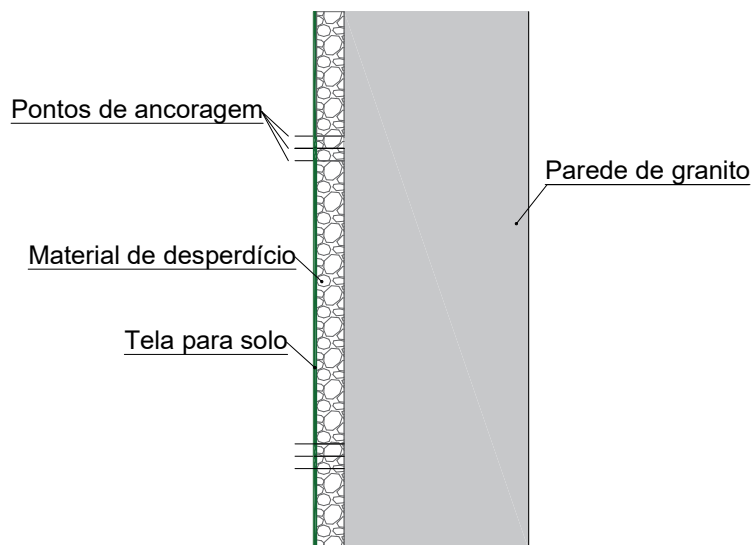


Figura 5.31 – Corte esquemático da proposta (elaborado com recurso ao *software AutoCAD*)

A aplicação da solução elaborada, implicaria a colagem dos pontos de ancoragem à parede e posteriormente, depois de secos, a colocação do material de desperdício. Desta forma, iniciou-se o processo de colagem dos pontos de ancoragem, que no curto período de tempo disponível, não permitiu que a cola atingisse a sua máxima resistência, tendo o processo de colocação do material, sido adiado. No dia em que se iria proceder à colocação do material, verificou-se que os pontos de ancoragem, apesar de estarem completamente colados, caíam assim que se tentava colocar o material, pois, a tinta da parede da escola, de idade avançada, acabava por quebrar nos pontos onde estavam colados os “espanta-pássaros”, uma vez que já não se encontrava com aderência à parede (Figura 5.35). Esta situação não foi prevista, uma vez que foram realizados testes em paredes em bom estado, onde ficou demonstrado que as peças plásticas aguentariam o peso do material.



Figura 5.32 – Aspeto dos pontos de ancoragem caídos

Face a este imprevisto, foi necessário encontrar uma nova solução. Pensou-se então em substituir os “espanta-pássaros” colados por pregos de aço a ancorar. Após um pequeno ensaio realizado *in situ*, concluiu-se que esta solução também não resultaria, pois, a parede era de granito e oferecia bastante resistência à pregagem, havendo inclusive zonas onde não seria possível pregar. No entanto, deixou-se a parte da parede ensaiada com o material de desperdício colocado dessa forma (Figura 5.36). Posto isto, a colocação do resto do material de desperdício foi novamente adiada, a fim de conceber novas formas de colocação do material.



Figura 5.33 – Solução aplicada com pregos de ancoragem

Uma vez que, em paralelo com este trabalho, decorria um, onde se pretendia proceder à melhoria do desempenho acústico da mesma sala de aula com materiais de desperdício, e onde se desejava ter instalada a solução térmica de modo a perceber o impacto que esta teria a nível sonoro, houve necessidade de obter a solução final num curto espaço de tempo. Desta forma, e uma vez que a única solução que resultaria seria através da fixação com pregos de aço, apesar da quantidade a utilizar ter de ser mínima, devido à dificuldade de pregagem, surgiu a ideia de criar umas almofadas (Figura 5.37).

Estas almofadas foram criadas com dois tipos de material, estando num lado instalada a tela de solo e no outro uma rede obtida *à posteriori*. Os dois materiais foram unidos com agrafos nas partes laterais e superior da almofada, tendo sido, na parte inferior, colocada uma ripa de madeira. Além disso, de forma a impedir que a almofada ficasse muito cheia e desproporcional, uma vez que se pretendia que tivesse uma espessura 5 cm, colocaram-se, nalguns pontos da almofada, pequenas abraçadeiras a fechar as duas redes, reduzindo o espaço onde o material de desperdício poderia ser colocado (Figura 5.37 e 5.38). As almofadas foram fixadas na parede apenas com três pregos na parte superior, tendo a ripa de madeira a função de aumentar o peso da almofada, permitindo que esta ficasse o mais possível junto da parede na parte inferior. Além disso, houve uma sobreposição da zona da ripa com zona dos pregos da almofada que se encontrava abaixo, de modo, a não haver partes da parede sem material de desperdício (Figura 5.39). Todas as almofadas foram colocadas com a parte da rede virada para a parede, uma vez que era o material mais maleável. Algumas almofadas foram ainda reforçadas com fita de alumínio de lado, de modo a garantir que não se perdia material de desperdício. A implementação da solução resultou na intervenção de cerca de 39% da parede em contacto com o exterior, estando o resultado final apresentado na Figura 5.40, e o seu esquema de montagem final representado na Figura 5.41.



Figura 5.34 – Enchimento das almofadas



Figura 5.35 – Almofadas finalizadas



Figura 5.36 – Pormenor da instalação



Figura 5.37 – Solução final implementada

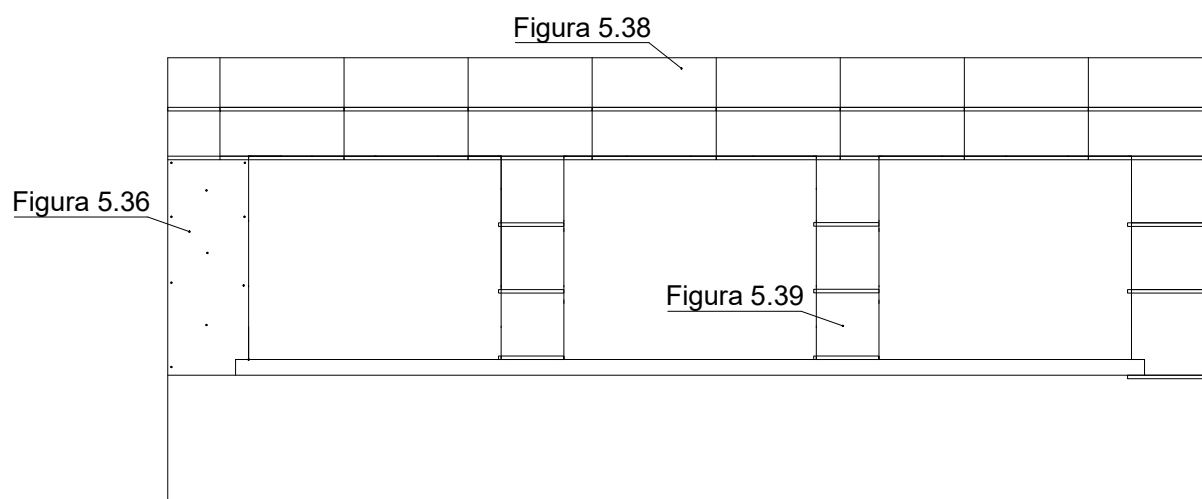


Figura 5.38 – Esquema de montagem final (elaborado com recurso ao *software AutoCAD*)

Relativamente ao material utilizado para melhorar o desempenho da porta de entrada da sala de aula, de modo a tapar a fissura da mesma, decidiu-se utilizar pacotes de leite abertos, uma vez que é um material resistente e fácil de obter. Assim, para a aplicação dos pacotes de leite na porta recorreu-se a fita cola metálica (Figura 5.42), tendo-se desta forma conseguido eliminar quase todas as entradas de ar indesejadas da porta de entrada da sala, melhorando o seu desempenho térmico. Esta intervenção vai ainda permitir diminuir o valor das perdas de calor por ventilação, uma vez que não será tida em conta a abertura de ar existente na situação inicial.



Figura 5.39 – Implementação da solução na porta de entrada da sala

## 5.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO FINAL

### 5.5.1. INTRODUÇÃO

Após a implementação da solução proposta, procedeu-se à avaliação de desempenho térmico, a fim de compreender se houve, de facto, uma melhoria no desempenho térmico da sala. Para isso, à semelhança da avaliação do desempenho térmico inicial, e tendo presente o zonamento climático onde a sala de aula se insere, será efetuado, primeiramente, o cálculo do valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento da sala ( $N_{ic}$ ) que, posteriormente, será comparado ao valor máximo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento da sala ( $N_i$ ), de modo a compreender se se verifica a condição  $N_{ic} \leq N_i$ .

Posto isto, mais uma vez analisar-se-á a dissipação do calor na sala de aula, no dia em que a sala foi aquecida após a intervenção da solução proposta. Caso a implementação tenha sido suficiente, notar-se-á que o calor fica retido na sala de aula durante um período superior, até a temperatura da sala estabilizar.

### 5.5.2. VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO LEGISLATIVO

Uma vez que a zona climática onde se insere a sala em estudo pertence à zona I2, é necessário relembrar que os valores dos coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência dos elementos opacos e dos vãos envidraçados para os edifícios de comércio e serviço encontram-se expostos na Tabela 5.4.

Posto isto, procedeu-se aos cálculos necessários para quantificar os valores máximo e real das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, que se encontram detalhados no Anexo A1. No entanto, é importante referir algumas decisões tomadas ao longo do cálculo do valor de  $N_{ic}$  e do valor do  $N_i$  que diferem do apresentado na situação inicial.

Primeiramente, no cálculo do coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente exterior, o material de desperdício foi inserido somente em PE1, uma vez este foi colocado apenas na parte superior da parede que não continha a placa de isolamento em couro. Relativamente às pontes térmicas lineares, os valores para os coeficientes de transmissão térmica lineares utilizados foram os retirados do Despacho n.º 15793-K/2013 [4], uma vez que, neste caso, toda a parede exterior possuía isolamento pelo interior.

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não úteis, apenas foi alterado o valor do  $U_{real}$  da porta, pois com a solução apresentada, houve uma melhoria do seu desempenho, devido à oclusão de fissuras da mesma.

Em relação às perdas de calor por ventilação, o valor de  $R_{ph}$  de referência foi mantido o mesmo, embora o valor do  $R_{ph}$  real tenha sido novamente estimado através da folha de cálculo “Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS” [131], pois, como se melhorou o desempenho térmico da porta, eliminou-se a entrada de ar existente anteriormente e contabilizada em 200 cm<sup>2</sup>. Assim, admitiu-se que haveria aberturas de admissão de ar na envolvente fixas com uma área livre de 1344 cm<sup>2</sup>, tendo esse valor sido obtido considerando apenas as duas grelhas de ventilação existentes, cada uma com 672 cm<sup>2</sup>. A folha de cálculo referente à estimativa do valor de  $R_{ph}$  final real poderá ser consultada no Anexo A2. A melhoria do desempenho térmico da sala potenciará um valor de perdas por ventilação, ligeiramente abaixo do valor da situação inicial, uma vez que as renovações de ar novo são desfavorecidas. No entanto, considerou-se indispensável proceder à melhoria do desempenho térmico da porta pois, é um elemento que deverá funcionar como isolador térmico e acústico da sala, sobretudo por se encontrar em contacto com um espaço não aquecido.

No cálculo da inércia térmica, apenas foi alterado o valor da contribuição da parede em contacto com o exterior onde foi colocado o material de desperdício, PE1, pois, ao colocar-se o material de desperdício nessa parede pelo lado interior, eliminou-se a sua contribuição para a inércia da sala de aula.

Posto isto, confirma-se, mais uma vez, a condição  $N_{ic} \leq N_i$ , como se pode perceber pela Tabela 5.11. No entanto, os valores obtidos têm novamente de ser criticados, devido ao facto de o valor de renovações de ar novo ser bastante inferior ao mínimo exigido, o que diminui consideravelmente o valor das perdas de calor por ventilação no cálculo do valor de  $N_{ic}$ . Apesar disso, verifica-se que, com a colocação do material de desperdício na parede em contacto com o exterior, o valor de coeficiente de transmissão térmica desta parede passa a cumprir os requisitos legislativos, uma vez que fica abaixo do valor máximo admissível. Desta forma, o valor do coeficiente de transferência de calor através da envolvente em contacto com o exterior,  $H_{ext}$ , diminui em 27% face à situação inicial, o que significa que houve uma diminuição das trocas de calor através da envolvente exterior. Em relação ao valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, verifica-se uma diminuição face à situação inicial, demonstrando que as medidas implementadas melhoraram o desempenho térmico da sala de aula.

Tabela 5.11- Valores obtidos no cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento na sala de aula

$N_{ic}$ [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	$N_i$ [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	$N_{ic} \leq N_i$
114,05	262,77	Verifica



### 5.5.3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A implementação da proposta ocorreu no dia 14 de março de manhã, tendo sido esse o único dia em que a sala foi aquecida após a intervenção. Nesse dia, da parte da manhã, apenas o SI1 se encontrava ligado no interior da sala, tendo sido trazido um novo sensor SI2 por volta das 13h00 que começou a registar às 14h00 quando a temperatura do sensor já se encontrava estabilizada. A temperatura da sala encontrava-se a 11,91°C antes de se ligarem os aquecedores às 09h30, tendo-se conseguido obter um valor máximo de temperatura na sala de 16,25°C, às 15h30. Posto isto, começaram a realizar-se testes de acústica na sala de aula, que justificam as pequenas oscilações na temperatura interior, principalmente visíveis no SI1, devido à entrada e saída de pessoas e materiais da sala. Os aquecedores foram desligados por volta das 18h30 do dia 14 de março.

Pela análise do gráfico abaixo (Figura 5.43), é possível verificar que, após o desligar dos aquecedores, a temperatura da sala continuou a descer, estabilizando apenas no dia 22 de março às 06h30 onde atingiu a temperatura de 10,10°C. Esta descida é bastante visível no gráfico e é acompanhada de pequenas subidas da temperatura interior da sala que coincidem com os picos de calor da temperatura exterior, pelo que não são consideradas com representativas. Deste modo, é possível concluir que o calor ficou retido na sala de aula por cerca de 180 horas o que, comparando com as dez horas em que o calor se dissipava na situação inicial, representa uma melhoria notória do desempenho térmico da sala.

#### Após a intervenção - Dia 14/mar

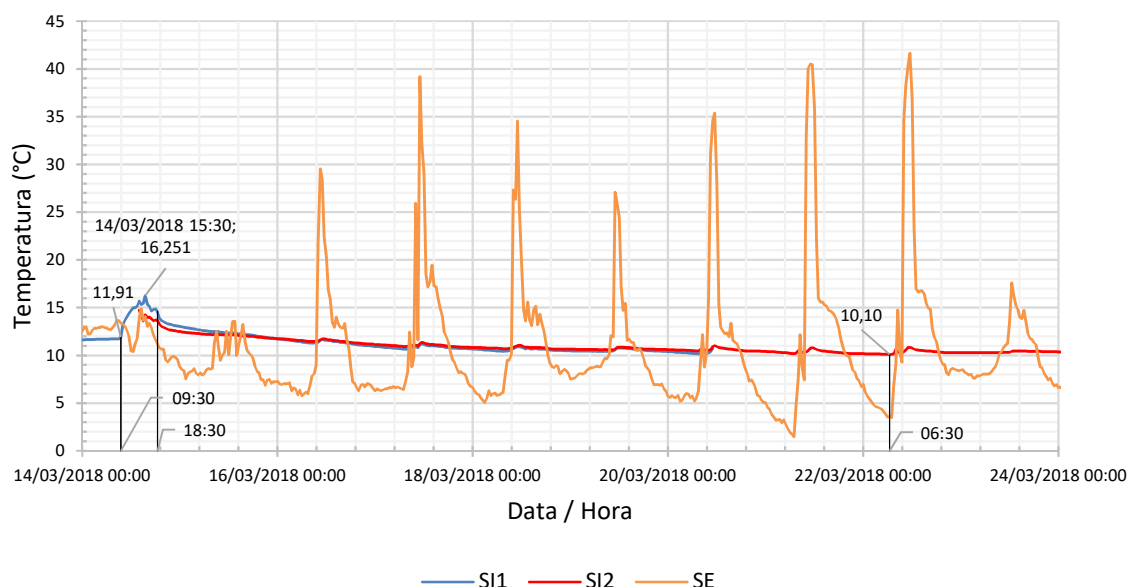


Figura 5.40 - Análise gráfica do aquecimento da sala de aula no dia 14 de março

Em relação aos resultados obtidos, apesar da temperatura máxima da sala ter sido superior às temperaturas máximas conseguidas com o aquecimento da sala antes da intervenção, os tempos de dissipação do calor são bastante diferentes, não sendo sequer da mesma ordem de grandeza, o que não pode ser tido como justificativo para uma diferença de temperatura de 3°C (13°C antes e 16°C depois). Além disso, existem descidas bruscas de temperatura na sala no dia 14 de março, depois de ter atingido os 16,25°C devido ao facto da porta da sala de aula ter sido várias vezes aberta, o que não aconteceu nos outros dias.

O facto de a temperatura exterior do dia 15 de março ter sido quase sempre inferior à da sala de aula, deveria ainda ter potenciado uma descida maior da temperatura interior, a fim de esta se estabilizar à temperatura exterior. Uma vez que isso não aconteceu, e é facilmente visível que a temperatura desce por um elevado período, prova, com clareza, que a resistência da parede foi melhorada, pois o isolamento térmico colocado diminui a perda térmica para o exterior por um período bastante superior à situação inicial. No entanto, verifica-se que entre os dias 16 e 22 de março, esteve sol e, portanto, este fator poderá ter contribuído para manter o calor dentro da sala de aula. Ainda assim, conclui-se que houve uma dissipação de calor bastante superior à dissipação de calor na situação inicial, causada pelas melhorias aplicadas. Desta forma, demonstra-se que o calor ficou retido por um período bastante superior, em relação à situação inicial, o que é um aspeto bastante positivo, no inverno, já que se reflete em diminuição das necessidades de aquecimento pois, de um dia para o outro, a sala retém o calor fazendo com que, no dia seguinte, a sala não precise de ser tão aquecida para atingir uma temperatura aceitável.

Em suma, poderá concluir-se que as medidas implementadas permitiram melhorar o desempenho térmico da sala de aula, promoveram um aumento da dissipação de calor bastante superior à situação inicial, pois o isolamento térmico diminuiu a perda térmica para o exterior. Os resultados obtidos são bastante satisfatórios, uma vez que se diminuiu as perdas de calor pela envolvente exterior em 27% apenas com a colocação de um material de desperdício em 11 m<sup>2</sup> da parede em contacto com o exterior, além disso, o valor do coeficiente de transmissão térmica da porta de entrada da sala de aula foi melhorado após a oclutação da fissura existente contribuindo ainda para a eliminação de uma fonte de dissipação de calor.

Convém não esquecer que os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, antes e após a intervenção, são bastante inferiores ao valor máximo. Tal só acontece, pois, a sala de aula não cumpre as exigências vigentes de ventilação e, desta forma, para o cálculo, as perdas de calor por ventilação são obviamente inferiores às de referência. Além disso, a sala de aula possui grandes envidraçados pouco protegidos que se refletem em grandes ganhos solares. Uma vez que o material de desperdício apenas foi colocado numa parede, existem ainda duas paredes em contacto com espaços não aquecidos que não cumprem o valor máximo de coeficiente de transmissão térmica. No entanto, para o caso em estudo, não poderiam ter sido realizadas medidas de melhoria neste âmbito, uma vez que apenas se utilizaram soluções provisórias. Experimentou-se colocar o valor de  $R_{ph_{real}}$  igual ao valor de  $R_{ph}$  de referência, e apurou-se que, ainda assim, a condição  $N_{ic} \leq N_i$  era verificada em ambas as situações, embora na situação inicial, o valor de  $N_{ic}$  esteja muito próximo do valor de  $N_i$  (Tabela 5.12). No entanto, ainda para este caso, os valores dos coeficientes de transmissão térmica das paredes da envolvente interior não cumpriam os requisitos legislativos.

Tabela 5.12 - Simulação de resultados com  $R_{ph_{ref}}$ 

	$N_{ic}$ [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	$N_i$ [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	$N_{ic} \leq N_i$
<b>Situação inicial-<math>R_{ph_{real}}</math></b>	143,35	262,77	Verifica
<b>Situação final- <math>R_{ph_{real}}</math></b>	114,05		Verifica
<b>Situação inicial - <math>R_{ph_{ref}}</math></b>	249,09		Verifica
<b>Situação final - <math>R_{ph_{ref}}</math></b>	223,28		Verifica

Além disso, realizou-se uma simulação onde se aplicou o material de desperdício nas duas paredes em contacto com os espaços não úteis e verificou-se que, face à situação inicial, o valor do coeficiente de transferência de calor por transmissão através da envolvente em contacto com espaços não úteis,  $H_{enu}$ , diminuía 58%. Em relação ao coeficiente global de transferência de calor por transmissão através da envolvente,  $H_{tr}$ , verifica-se que, com a colocação do material de desperdício em todas as paredes da envolvente, existe uma diminuição das perdas de calor através da envolvente em cerca de 33% face à situação inicial (Tabela 5.13), o que demonstra que a aplicação do material de desperdício utilizado na sala de aula tem um impacto bastante positivo na diminuição do valor de perdas de calor pela envolvente, permitindo assim diminuir o valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento.

Tabela 5.13 - Simulação de resultados aplicando o material de desperdício nas paredes em contacto com espaços não úteis

	$H_{tr}$ [W/°C]	Redução do $H_{tr}$
<b>Situação inicial-Real</b>	283,80	14%
<b>Situação final- Real</b>	244,55	
<b>Situação inicial-Simulação</b>	283,80	33%
<b>Situação final - Simulação</b>	190,15	

## 5.6. RESUMO DO CAPÍTULO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo da melhoria do desempenho térmico de uma sala de aula, recorrendo ao uso de materiais de desperdício. A sala de aula pertence a uma escola do Plano dos Centenários sendo um projeto do tipo Urbano onde as salas apresentam as dimensões 8,0 x 6,0 m com um pé-direito de 3,5m.

Foram realizadas algumas visitas à escola, que neste momento se encontra desativada devido à não existência de condições térmicas, onde foram analisadas as condições iniciais da sala e onde foi possível realizar um levantamento das medidas que poderiam ser adotadas a fim de melhorar o seu desempenho térmico. Para o estudo, não foram disponibilizadas plantas de projeto, materiais utilizados, nem histórico de intervenções, e as medidas a implementar teriam de ser aplicadas de forma provisória. Assim, após verificação das principais falhas térmicas da sala, optou-se por se intervir apenas na parede em contacto com o exterior, através da implementação de um material de desperdício colocado no interior e na porta de entrada da sala, que se encontrava bastante degradada e apresentava algumas fissuras. Com o intuito de proceder à avaliação do desempenho térmico inicial da sala e, após a implementação da proposta, foram colocados três sensores no interior da sala de aula e um no exterior, que fizeram a monitorização da temperatura ao longo do estudo, registando valores de temperatura e humidade relativa de 30 em 30 minutos.



### Situação inicial



$$N_{ic} = 143,35 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$$

$$N_i = 262,77 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$$

$$N_{ic} \leq N_i - \text{Verifica}^*$$

### Estudo do material de desperdício



$$\text{Massa volúmica seca} = 208,7 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda = 0,076 \text{ W/m}^2$$

### Situação final



$$N_{ic} = 114,05 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$$

$$N_i = 262,77 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$$

$$N_{ic} \leq N_i - \text{Verifica}^*$$

\* a verificação da condição  $N_{ic} \leq N_i$  em ambos os casos é amplamente criticada, pois o valor das renovações de ar novo na sala de aula é bastante inferior ao valor mínimo exigido, não tendo sido possível, no presente estudo, executar melhorias a esse nível. Além disso, os valores dos coeficientes de transmissão térmica dos elementos opacos encontravam-se acima dos valores máximos regulamentado e com a colocação do material de desperdício, apenas se conseguiu cumprir esse requisito regulamentar na parede em contacto com o exterior. Acresce ainda o facto de a sala de aula possuir grandes envidraçados que se refletem em grandes ganhos solares.



# 6

## CONCLUSÕES

### 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com esta dissertação, é possível aferir que a vertente prática do trabalho realizado tem bastante aplicabilidade, uma vez que, tratando-se de uma escola do Plano dos Centenários, onde todos os projetos eram idênticos, as medidas propostas podem facilmente ser reproduzidas nas restantes salas e em outros edifícios.

A realização deste trabalho ficou um pouco condicionada pela falta de informação sobre a escola em estudo, nomeadamente, plantas de projeto e histórico de intervenções. No entanto, pela inspeção visual realizada *in loco* e pela consulta do projeto de outra escola do Plano dos Centenários, a aproximação das características construtivas do edifício não será muito diferente da adotada. O histórico de intervenções foi ainda complementado através da consulta do Projeto Educativo do Agrupamento [123] que descreve algumas intervenções realizadas ao longo do tempo. Além disso, o facto de as medidas propostas terem de ser implementadas de forma provisória e em grande parte da parede em contacto com o exterior (cerca de  $11\text{ m}^2$ ), limitou bastante as opções, quer de materiais a utilizar, quer da forma de aplicação dos mesmos.

Aquando da análise da legislação, compreendeu-se que em todas as situações se cumpria a condição  $N_{ic} \leq N_i$ , embora alguns requisitos regulamentares não fossem cumpridos. O facto de as renovações de ar novo serem muito inferiores às mínimas exigidas, levou à diminuição do valor das perdas de calor por ventilação, e desta forma, os valores das necessidades nominais de energia útil para aquecimento ficaram bastante inferiores aos que se verificariam se as renovações de ar novo fossem as mínimas exigidas. Além disso, nenhuma parede da envolvente da sala cumpria os valores máximos de coeficientes de transmissão térmica,  $U$ , tendo-se apenas conseguido fazer cumprir o valor da envolvente exterior com a colocação do material de desperdício.

Apesar disso, realizaram-se cálculos que permitiram aferir que, quando assumido o valor de  $R_{ph_{real}}$  igual ao valor de  $R_{ph}$  de referência, verificava-se que na situação inicial, os valores de  $N_{ic}$  e  $N_i$  eram bastante próximos, podendo a alteração de um valor no cálculo levar facilmente ao não cumprimento da condição  $N_{ic} \leq N_i$ . Foi ainda realizada uma simulação onde se colocou o material de desperdício nas duas paredes em contacto com espaços não úteis que provou o impacto positivo que o material de desperdício tem na diminuição das perdas de calor pela envolvente.

Importa relembrar que o cálculo das necessidades nominais anuais de energia útil deveria ser aplicado a toda a escola e não apenas à sala de aula em estudo. Desta forma, a verificação da condição  $N_{ic} \leq N_i$  não será muito representativa, uma vez que apenas se está a calcular para uma divisão do edifício. Acresce ainda o facto de se terem admitido valores que poderão não corresponder à realidade, como as características construtivas do edifício, que por essa razão, podem condicionar os valores obtidos no cálculo das necessidades de aquecimento da sala. Assim, em termos de cálculo, a melhoria do desempenho térmico da sala de aula fica demonstrada pela diminuição do valor das necessidades nominais de energia útil para aquecimento da sala de aula.

O trabalho realizado representa apenas um estudo preliminar sobre medidas que promovem melhorias do desempenho térmico em sala de aula com materiais de desperdício. Se se pudesse aceder às plantas de projeto da escola, assim como aos materiais utilizados na sua construção, seria bastante interessante proceder à verificação da condição  $N_{ic} \leq N_i$  em todo o edifício, e compreender que valores de  $N_{ic}$  seriam obtidos, com a aplicação do material de desperdício nas restantes paredes em contacto com o exterior. Ainda assim, o que se conclui deste trabalho é que existem grandes potencialidades de reabilitação térmica de edifícios com recurso a materiais de desperdício, sem custos de intervenção e salvaguardando o meio ambiente.

Os resultados obtidos pelos sensores também foram condicionados. O sensor exterior foi protegido das condições climatéricas e colocado num local de especial incidência solar, o que implicou que se tivessem registado valores incoerentes, que não permitiram verificar a curva real da temperatura exterior, em dias de sol.

Em relação aos materiais de desperdício utilizados, os pacotes de leite, usados na porta de entrada da sala, revelaram-se uma boa opção para ocultar a fissura, dada a sua resistência. A sua aplicação permitiu melhorar o desempenho térmico da porta. O material utilizado na parede provou ser um material com boa capacidade térmica, quando comparado com outros materiais termicamente eficientes, sem adição de ligante. A massa volumica deste material revelou-se superior ao esperado, sendo esse fator justificado pela existência de sedimentos finos na sua composição que se encontram misturados com a parte fibrosa do material, que é apenas visível quando se manuseia o material em grandes quantidades.

A implementação da proposta foi uma tarefa difícil, devido às condicionantes da sala de aula. Para além da tinta da parede se encontrar com pouca aderência, devido à sua idade avançada, impedindo uma solução segura com cola de montagem, o facto de a parede da sala ser de granito, tornou também a pregagem uma tarefa árdua, pois não foi possível pregar com critério, em todas as zonas da parede, nem fixar devidamente os pregos.

No entanto, as soluções propostas revelaram-se eficazes, tendo-se obtido resultados finais bastante satisfatórios, pois verificou-se uma melhoria notória do desempenho térmico da sala de aula, com recurso a materiais de desperdício. Além disso, é bastante gratificante compreender que não houve custos associados às melhorias propostas e que, além disso, se possibilitou o aproveitamento de materiais tidos como desperdício.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

O trabalho realizado apenas se focou no aspeto térmico, na estação de aquecimento, sendo ainda necessário estudar as melhorias do desempenho térmico da sala de aula na estação de arrefecimento. Além disso, é essencial estudar o material de desperdício utilizado na parede com mais detalhe, nomeadamente caracterizando aspetos descritos no capítulo 3, como comportamento ao fogo e comportamento face à água, entre outros. Só assim se poderá verificar se de facto o material poderá ser utilizado em casos reais. Seria ainda interessante proceder ao seu estudo após ter sido peneirado, a fim de compreender se o valor da massa volúmica diminui e se as suas capacidades térmicas se mantêm. Poderá ainda ser interessante o estudo do desempenho deste material com a aplicação de um ligante, a fim de compreender se o valor de condutibilidade térmica diminui, ou desenvolver o material em manta.

As escolas do Plano dos Centenários são locais excelentes para este tipo de estudos, uma vez que existem em grande quantidade, muitos deles encontram-se desativados, são edifícios replicados de um projeto-tipo, sendo construídos a partir de uma sala célula reproduzida nos edifícios. Assim, há todo o interesse em aproveitar esses edifícios para realizar estudos, pois são edifícios reais, que precisam de intervenção e de soluções que permitam dar-lhes novo uso. Além disso, os estudos efetuados podem apenas ser realizados numa sala de aula e reproduzidos nas restantes, quando os resultados são positivos. Deste modo, seria ainda curioso explorar uma solução integrada válida que pudesse ser implementada no mercado e que permitisse ser aplicada da mesma forma, mediante pequenos ajustes, a todas os edifícios escolares do Plano dos Centenários, consoante os projetos-tipo apresentados no capítulo 4.

A temática explorada neste trabalho constitui uma área plena de potencialidades, pois, apesar de haver alguns materiais já estudados e/ou comercializados, outros ficam por um estudo inicial, existindo ainda muitas opções que têm que ser estudadas ao detalhe.

Urge encontrar soluções sustentáveis que permitam reduzir o consumo de recursos, que utilizem materiais de desperdício, e soluções que aproveitem os desperdícios das indústrias, tornando-os na matéria-prima de outras, promovendo assim uma economia circular e uma construção sustentável. O desenvolvimento de materiais de isolamento térmico sustentáveis, além de preservarem o meio ambiente possibilitam ainda reduzir a energia utilizada pelos edifícios.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Rodrigues António *et al.*, *Térmica de edifícios* vol. 1.<sup>a</sup> ed. Alfragide: Edições Orion, 2009.
- [2] P. C. P. d. Silva, "Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE " Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2006.
- [3] S. F. Fernandes, "Projeto de reabilitação térmica de um edifício antigo em Viseu," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [4] *Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013*, Diário da República, 2.<sup>a</sup> série - N.º 234 - 3 de dezembro de 2013, pp. 35088-(58) - 35088-(87).
- [5] *Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013*, Diário da República, 2.<sup>a</sup> série - N.º 234 - 3 de dezembro de 2013, pp. 35088-(41) - 35088-(54).
- [6] ITeCons. *Catálogo Online de Pontes Térmicas Lineares* [Acedido a 26/03/2018]. Disponível em: <https://www.itecons.uc.pt/catalogoptl/index.php>
- [7] *Portaria n.º 349-B/2013 de 29 de novembro de 2013*, Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série - N.º 232, pp. 6624-(18) - 6624-(29).
- [8] *Portaria n.º 353-A/2013 de 4 de dezembro*, Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia da Saúde e da Solidariedade Emprego e Segurança Social. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série - N.º 235, pp. 6644-(2) - 6644-(9). 2013.
- [9] Q. Portugal Instituto Português da, *Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás NP 1037-1: 2002 Parte 1 edifícios de habitação. Ventilação natural*. Lisboa: IPQ, 2002.
- [10] R. Samagaio Beatriz, "Avaliação da reabilitação térmica de coberturas com desvão," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2014.
- [11] *Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto de 2013*, Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série - N.º 159, pp. 4988-5005.
- [12] *Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril de 2006*, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. Diário da República - I Série - A - N.º 67, pp. 2411-2415.
- [13] *Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril de 2006*, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. Diário da República - I Série -A- N.º 67, pp. 2416-2468.
- [14] *Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril de 2006*, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. Diário da República - I Série-A , nº 67 pp. 2468-2513.
- [15] *Portaria n.º 349-D/2013 de 2 de dezembro*, Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia e da Solidariedade Emprego e Segurança Social. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série - N.º 233, pp. 6628-(40) - 6628-(73). 2013.
- [16] *Portaria n.º 349-A/2013 de 29 de novembro de 2013*, Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. Diário da República, 1.<sup>a</sup> série - N.º 232, pp. 6624-(13) - 6624-(17).
- [17] *Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013*, Diário da República, 2.<sup>a</sup> série - N.º 234 - 3 de dezembro de 2013, pp. 35088-(26) - 35088-(31).
- [18] V. P. d. Freitas, "Slides de apoio às aulas de térmica de edifícios," ed. Porto: FEUP, 2014.

- [19] V. P. d. Freitas and M. Pinto, *Metodologia para a definição exigencial de isolantes térmicos*. [Porto]: Laboratório de Física das Construções, 1997.
- [20] C. A. P. d. Santos; and L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, 1.<sup>a</sup> edição ed. LNEC, 2006.
- [21] V. P. d. Freitas and P. d. S. Pinto, *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção condensações internas* vol. 2<sup>a</sup> ed. Porto: Laboratório de Física das Construções. Faculdade de Engenharia, 2000.
- [22] M. A. P. d. Silva, "Metodologia para a definição exigencial de isolantes térmicos," Dissertação de Mestrado em Construção de Edifícios, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 1996.
- [23] EDF. *Le guide des matériaux pour l'isolation thermique* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: [http://doctechno.free.fr/IMG/pdf/EDF\\_Guide\\_isolation\\_thermique.pdf](http://doctechno.free.fr/IMG/pdf/EDF_Guide_isolation_thermique.pdf)
- [24] Ecocasa, *Lã de Rocha*. Quercus- Associação Nacional de Conservação da Natureza, [Online]. Disponível em: [https://www.ecocasa.pt/userfiles/file/La\\_de\\_Rocha.pdf](https://www.ecocasa.pt/userfiles/file/La_de_Rocha.pdf)
- [25] *Laine de roche pare-vapeur 5x1,2 m Ep. 100 mm - Rockwool* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: <https://www.bricodepot.fr/catalogue/laine-de-roche-pare-vapeur5x12m-ep-100mm/prod40476/#lg=1&slide=0>
- [26] *Lot de 8 panneaux de laine de roche Ep. 100 mm L. 1,35 m l. 0,60 m - ROCKWOOL* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: <https://www.bricodepot.fr/catalogue/lot-de-8-panneaux-de-laine-de-roche-ep-100mm-l-135m-l-060m/prod40479/>
- [27] *Laine de verre 80 mm mrk 40 kraft ursa r=2 rouleau de l. 1,20 x L. 11 m pour combles perdus* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: <https://www.mesmatériaux.com/isolation-platrerie-4/isolation-2546/isolation-des-combles-2547/comble-perdus-1687/laine-de-verre-80-mm-mrk-40-kraft-ursa-r-2-rouleau-de-l-1-20-x-l-11-m-pour-comble-perdus-14878.html>
- [28] *LAINE DE VERRE URSA* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: <http://brico.leclercmdm.com/isolation-mur/768-laine-de-verre-ursa.html>
- [29] *Argile expansée* [Acedido a 22/03/2018]. Disponível em: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile\\_expansée](https://fr.wikipedia.org/wiki/Argile_expansée)
- [30] *Betão Celular- Ficha Técnica* [Acedido a 02/04/2018]. Disponível em: [www.sotecnisol.pt](http://www.sotecnisol.pt)
- [31] *Isoltech - aditivo endurecedor/para contrapiso/ para concreto celular* [Acedido a 02/04/2018]. Disponível em: <http://www.archiexpo.com/pt/prod/isoltech/product-150636-1777435.html>
- [32] *Bétons prêts à l'emploi légers, isolants et structurels- à base argile expansée laterlite* [Acedido a 02/04/2018]. Disponível em: <https://www.laterlite.es/wp-content/uploads/2015/10/BPE-AVEC-ARGILE-EXPANSEE.pdf>
- [33] J. F. Natalli. *O Concreto Leve* [Acedido a 02/04/2018]. Disponível em: <https://blogreciclos.wordpress.com/2016/08/31/o-concreto-leve/>
- [34] *Isolamento e enchimento* [Acedido a 02/04/2018]. Disponível em: <http://argex.pt/isolamento-enchimento.html#>
- [35] F. Batista, "O uso da cortiça na construção sustentável," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2017.



- [36] *Materiais Ecológicos* [Acedido a 03/04/2018]. Disponível em: <https://www.comterra.pt/materias-ecologicos>
- [37] *Aglomerado de cortiça expandida* [Acedido a 03/04/2018]. Disponível em: <https://www.amorimisolamentos.com/produtos/Aglomerado-de-cortiça-expandida/60/>
- [38] (2013). *Proyecto Colrecepts. Una salida sostenible para los residuos de poliestireno expandido* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/proyecto-colrecepts-una-salida-sostenible-para-los-residuos-de-poliestireno-expandido/3963>
- [39] *Stirodur 5cm* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <http://brezaenterijeri.com/proizvodi/stirodur-5cm/>
- [40] *Placa de poliuretano* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/construcao/isomil/produtos/isolamento-termico-e-acustico/placa-de-poliuretano>
- [41] *Painéis Sandwich de Cobertura e Revestimento* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <http://www.jsoarescorreia.pt/produtos/paineis-sandwich-de-cobertura-e-revestimento/>
- [42] *Isopol. Lã de Rocha Projetada* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: <http://www.isopol.pt/?action=paginas&id=4>
- [43] *Polirigido. Retail Park Leiria* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: <http://www.polirigido.com/pt/portfolio/isolamentos-termicos/la-de-rocha-projetada/retail-park-leiria>
- [44] *Blocos térmicos* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: [www.artebel.pt](http://www.artebel.pt)
- [45] *Artebel. mergeTÉRMIICO* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: [http://www.artebel.pt/index.php/produtos/blocos\\_termicos/megatermico](http://www.artebel.pt/index.php/produtos/blocos_termicos/megatermico)
- [46] *Artebel. Forra Térmica XPS* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: [www.artebel.pt/index.php/produtos/blocos\\_termicos/forra\\_termica\\_xps](http://www.artebel.pt/index.php/produtos/blocos_termicos/forra_termica_xps)
- [47] *N. Dias. Betão Celular Autoclavado* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: <https://engenhariacivil.wordpress.com/2008/02/11/betao-celular-autoclavado/>
- [48] *Bloco de Concreto Celular Autoclavado 60x30x7,5cm Precon* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: [https://www.leroymerlin.com.br/bloco-de-concreto-celular-autoclavado-60x30x7,5cm-precon\\_87519145](https://www.leroymerlin.com.br/bloco-de-concreto-celular-autoclavado-60x30x7,5cm-precon_87519145)
- [49] *Neoplas - Inovação em isolamento térmico* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: <http://www.plastimar.pt/index.php?id=10&tbl=registos&id2=9>
- [50] *EPS com grafite* [Acedido a 15/04/2018]. Disponível em: <http://www.linhasgerais.pt/pt/content/13-news>
- [51] *Topeca. placa EPS com grafite* [Acedido a 14/04/2018]. Disponível em: <https://pt.topeca.pt/catalogo/isolamentos-termicos-e-acusticos/placa-eps/placa-eps-com-grafite.html>
- [52] *Ecocasa, Espuma de poliuretano. Quercus - Associação Nacional de Conservação da Natureza,* [Online]. Disponível em: <https://www.ecocasa.pt/userfiles/file/documentacao/construcao/ESPUMA%20DE%20POLIURETANO.pdf>

- [53] *Aislamiento Poliuretano* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <https://aislaconpoliuretano.com/polietano-proyctado-el-mejor-aislante-termico.htm>
- [54] *Isolamentos térmicos e acústicos* [Acedido a 04/04/2018]. Disponível em: <http://www.crialazer.com/isolamentos.html>
- [55] F. Silva Filipe Manuel, "Estudo de materiais de isolamento térmico inovadores," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [56] A. Soleimani Dorcheh and M. H. Abbasi, "Silica aerogel; synthesis, properties and characterization", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 199, no. 1, pp. 10-26, 2008. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607009909>
- [57] N. Hüsing and U. Schubert, "Aerogels—Airy Materials: Chemistry, Structure, and Properties", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 37, no. 1-2, pp. 22-45, 1998. [Online]. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291521-3773%2819980202%2937%3A1%2%3C22%3A%3AAID-ANIE22%3E3.0.CO%3B2-I>
- [58] P. N. P. C. R. d. Figueiredo, "Materiais de isolamento térmico inovadores e sua influência no desempenho higratérmico de uma parede exterior," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2014.
- [59] "Spaceloft," in *For buildings home - Insulation*, A. aerogels, Ed., ed. Aspen aerogels, 2016.
- [60] "Vacuum Insulation - Panel Properties and Building Applications ", ed. HiPTI- High Performance Thermal Insulation IEA/ECBCS Annex 39, 2005.
- [61] *Vacuum Insulation Panels(VIP) with Fumed Silica Kernels for External Wall Insulation* [Acedido a 15/04/2018]. Disponível em: <http://www.vacuumisolation.com/vacuum-insulation-panel/vacuum-insulation-panels-vip-with-fumed.html>
- [62] M. Cyril, *Performances des produits réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe des bâtiments en tant que complément d'isolation thermique*. 2007. [Online]. Disponível em: <http://www.enviroboite.net/isolant-performances-des-produits-minces-reflechissants-opaques>
- [63] C. Michels, "Análise da Transferência de Calor em Coberturas com Barreiras Radiantes," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis, 2007.
- [64] *Reflective Insulation* [Acedido a 15/04/2018]. Disponível em: <http://www.radiantbarrier.com/bubble-foil-insulation.htm>
- [65] J. P. L. d. Neves, "Reabilitação sustentável de edifícios escolares," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FCT: Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [66] H. Corvacho, "Enquadramento- A sustentabilidade," ed. Porto: FEUP, 2017, p. 18.
- [67] H. Brundtland Gro, *Report of the World Commission on Environment and Development our common future*. Oslo: ONU. World Commission on Environment and Development, 1987.
- [68] E. Parliament. (2018). *Waste management in the EU: infographic with facts and figures* [Acedido a 08/04/2018]. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20180328STO00751/eu-waste-management-infographic-with-facts-and-figures>
- [69] B. Edwards, *O guia básico para a sustentabilidade*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, SL, 2008.

- [70] R. F. M. d. S. Mateus, "Avaliação da Sustentabilidade da Construção - Propostas para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis," Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, 2009.
- [71] A. F. B. Valério, "Materiais para uma construção sustentável: O caso da cortiça," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FCT: Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [72] *Environment: Waste* [Acedido a 09/04/2018]. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/>
- [73] V. H. d. F. Pereira, "Desperdício e design: Estudo centrado no (re)aproveitamento e reutilização do desperdício do couro na indústria do calçado," Dissertação de Mestrado em Design Industrial e de Produto, FBAUP: Universidade do Porto, Porto, 2015.
- [74] M. J. Ferreira and M. F. e. Almeida, "Gestão de resíduos de calçado", *Construções Magazine*, 2009.
- [75] *Atlanta* [Acedido a 11/04/2018]. Disponível em: <http://www.atlantasteps.com/index.php>
- [76] A. Silva *et al.*, "From waste to sustainable materials management: Three case studies of the transition journey", *Waste Management*, vol. 61, pp. 547-557, 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16307334>
- [77] F. Asdrubali *et al.*, "A review of unconventional sustainable building insulation materials", *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 4, pp. 1-17, 2015. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>
- [78] A. Ayadi *et al.*, "Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass", *Powder Technology*, vol. 208, no. 2, pp. 423-426, 2011. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591010004304>
- [79] *FOAMGLAS* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <https://www.foamglas.com/>
- [80] *Johns Manville* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <http://www.jm.com/>
- [81] F. Intini and S. Kühtz, "Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 4, pp. 306-315, 2011. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0267-9>
- [82] *Thermal and acoustic insulation material in fireproof nonallergenic recycled fiber for PET* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <http://www.maiano.it/eng/node/73>
- [83] *Thermal and acoustic insulation material in polyester with superior performance* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <http://www.maiano.it/eng/node/134>
- [84] M. Matusiak, "Investigation of the thermal insulation properties of multilayer textiles", *FIBRES&TEXTILES in Eastern Europe*, vol. 14, no. 5, p. 59, 2016. [Online]. Disponível em: [http://www.fibtex.lodz.pl/59\\_25\\_98.pdf](http://www.fibtex.lodz.pl/59_25_98.pdf)
- [85] S. B. Stanković *et al.*, "Thermal properties of textile fabrics made of natural and regenerated cellulose fibers", *Polymer Testing*, vol. 27, no. 1, pp. 41-48, 2008. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941807001316>
- [86] D. Bhattacharjee and V. K. Kothari, "Heat transfer through woven textiles", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 7, pp. 2155-2160, 2009. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001793100800611X>

- [87] A. Briga-Sá *et al.*, "Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution", *Construction and Building Materials*, vol. 38, pp. 155-160, 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812006332>
- [88] I. C. Valverde *et al.*, "Development of New Insulation Panels Based on Textile Recycled Fibers", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 4, no. 1, pp. 139-146, 2013. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9124-8>
- [89] P. Ricciardi *et al.*, "Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment", *Applied Energy*, vol. 134, pp. 150-162, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914008034>
- [90] *Thermal and acoustic insulation in recycled textil fibers* [Acedido a 16/04/2018]. Disponível em: <http://www.maiano.it/eng/products/construction/recycletherm.html>
- [91] *Thermal Applications* [Acedido a 16/04/2018]. Disponível em: <http://www.inno-therm.com/product-information/thermal-applications/>
- [92] F. Asdrubali *et al.*, "Innovative Cardboard Based Panels with Recycled Materials from the Packaging Industry: Thermal and Acoustic Performance Analysis", *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 321-6, 2015. [Online]. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.652>
- [93] J.-O. Yeon *et al.*, "Physical properties of cellulose sound absorbers produced using recycled paper", *Construction and Building Materials*, vol. 70, pp. 494-500, 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814008502>
- [94] *Isocell - Isolamento térmicos* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <http://www.grupoepicentro.com/isocell-isolamento-termico/>
- [95] *Celulose Projetada* [Acedido a 17/04/2018]. Disponível em: <http://www.isorenel.pt/celulose-projectada/>
- [96] M. Vasilache *et al.*, "Use of waste materials for thermal insulation in buildings," in *Environmental Engineering and Management Journal* vol. 9, ed, 2010, pp. 1275-1280.
- [97] R. d. Carvalho, *História do ensino em Portugal desde a fundação da nacionalidade até ao fim do regime de Salazar-Caetano* vol. 4ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. Serviço de Educação e Bolsas, 2008.
- [98] *Os Edifícios Escolares do Plano Centenário* [Acedido a 18/04/2018]. Disponível em: <http://193.137.22.223/pt/patrimonio-educativo/museu-virtual/exposicoes/os-edificios-escolares-do-plano-dos-centenarios/>
- [99] M. D. G. Serranito, "Escolas Primárias do Plano dos Centenários do Concelho de Redondo," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia: Universidade de Évora, Évora, 2014.
- [100] P. S. P. Pimenta, "A Escola Portuguesa do "Plano dos Centenários" à construção da rede escolar no distrito de Vila Real," Dissertação de Mestrado em Educação, Universidade do Minho, Instituto de Educação e Psicologia, 2006.
- [101] V. P. d. Freitas and R. Almeida, "Reabilitação de edifícios escolares: Avaliação do desempenho higrótérmico em serviço e exigências regulamentares", *Construção Magazine*, vol. 34, pp. 10-14, 2009.

- [102] M. M. M. S. R. V. Gomes, "A reabilitação dos equipamentos escolares públicos como componente de regeneração urbana," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [103] *Guia técnico de reabilitação habitacional* vol. 2ª ed. Lisboa: Instituto Nacional de Habitação Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.
- [104] *Capoto (Isolamento Térmico)* [Acedido a 01/05/2018]. Disponível em: <http://www.sepsancho.com/galeria-virtual/construcao-diversa/isolamentos/isolamento-termico-capoto/capoto-isolamento-termico/>
- [105] T. M. D. Ferreira, "Sobre a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior em edifícios residenciais em Portugal: Análise do desempenho higratérmico," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2006.
- [106] C. Natural. *Painéis de Isolamento Térmico de Fibra de Madeira Pavadentro* [Acedido a 15/06/2018]. Disponível em: <http://www.casa-natural.com/pt/paineis-de-isolamento-termico-de-fibra-de-madeira>
- [107] *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais*. Lisboa, 2004. [Online]. Disponível em: [http://eficiencia-energetica.com/images/upload/Reabilitacao\\_energetica.pdf](http://eficiencia-energetica.com/images/upload/Reabilitacao_energetica.pdf)
- [108] *Isolamento térmico parede* [Acedido a 02/05/2018]. Disponível em: [http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instalacoes\\_e\\_equipamento\\_industrial/metallu-m-caldeiraria-e-manutencao-industrial/produtos/isolamento-termico-e-acustico/isolamento-termico-parede](http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instalacoes_e_equipamento_industrial/metallu-m-caldeiraria-e-manutencao-industrial/produtos/isolamento-termico-e-acustico/isolamento-termico-parede)
- [109] R. Teixeira Fernando Jorge, "Reabilitação do ponto de vista térmico em pavimentos actuais exigências, novos materiais e tecnologias construtivas," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [110] *Coberturas invertidas* [Acedido a 02/05/2018]. Disponível em: <https://forumdacasa.com/discussion/24453/coberturas-invertidas/>
- [111] C. Martins Ana Maria, "Reabilitação térmica e energética de vãos envidraçados as actuais exigências regulamentares," Dissertação de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2009.
- [112] E. PARQUE ESCOLAR. *Objetivos* [Acedido a 27/04/2018]. Disponível em: <https://www.parque-escolar.pt/pt/programa/objetivos.aspx>
- [113] C. Torres Filipe Manuel, "Análise técnico-económica das soluções construtivas utilizadas na reabilitação de escolas," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [114] E. PARQUE ESCOLAR, "Relatório da Avaliação da Qualidade do Serviço da Parque Escolar," Lisboa, 2009.
- [115] E. PARQUE ESCOLAR, *Especificações Técnicas de ARQUITETURA*. 2017. [Online]. Disponível em: <https://www.parque-escolar.pt/docs/site/pt/programa/Parque-Escolar-Manual-Especificacoes-Tecnicas-Arquitetura.pdf>

- [116] M. Cardoso Vitor Emanuel, "Reabilitação de edifícios escolares-Characterização do desempenho higratérmico em serviço," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2014.
- [117] E. PARQUE ESCOLAR. *ESCOLA SECUNDÁRIA DE MONTEMOR-O-VELHO* [Acedido a 15/06/2018]. Disponível em: <https://www.parque-escolar.pt/pt/escola/066>
- [118] E. PARQUE ESCOLAR, *Manual de Projecto: Instalações Técnicas*. 2009. [Online]. Disponível em: [https://www.dgae.mec.pt/?wpfb\\_dl=917](https://www.dgae.mec.pt/?wpfb_dl=917)
- [119] *II- Alguns referenciais técnicos para a construção/ampliação/requalificação de escolas na perspectiva do centro escolar*. Centro Escolar, [Online]. Disponível em: <http://www.centroescolar.min-edu.pt/np4/programa>
- [120] R. American Society of Heating and E. Air-Conditioning, *ANSI/ASHRAE Standard 55: 2010 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* Atlanta: ASHRAE, 2010.
- [121] *Os Planos para o Porto – dos Almadás aos nossos dias* [Acedido a 07/06/2018]. Disponível em: <http://doportoenaoso.blogspot.com/2010/09/os-planos-para-o-porto-dos-almadas-aos.html>
- [122] R. Rocha Cláudia Raquel Sousa, "Parque escolar: avaliação da adaptabilidade das soluções construtivas de reabilitação às exigências actuais," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FEUP: Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [123] "Projeto educativo de agrupamento," in *Agrupamento vertical de escolas D. Afonso Henriques*, ed. Governo de Portugal, Triénio 2013/2016.
- [124] J. M. d. S. Carlos, "Escolas do Ensino Básico "Tipificadas" (Plano dos Centenários): Avaliação do seu desempenho térmico e propostas de intervenção," Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, FCT:Universidade de Coimbra, Coimbra, 2005.
- [125] NaturDecoTech. *Composição: 50% vermelho + 50% tons diversos* [Acedido a 13/05/2018]. Disponível em: [http://www.naturdecotech.com/#prettyPhoto\[pp\\_gal\]/1/](http://www.naturdecotech.com/#prettyPhoto[pp_gal]/1/)
- [126] *Specifications* [Acedido a 14/05/2018]. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-011>
- [127] *HOB0 Temp/RH 2.5% Data Logger* [Acedido a 14/05/2018]. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-011>
- [128] "Manual de Funcionamento " in *"CT-Mètre"*, ed. Porto: Laboratório de Física das Construções, da F.E.U.P, 2002.
- [129] *Despacho (extrato) n.º 15793-E/2013*, Diário da República, 2.ª série - N.º 234 - 3 de dezembro de 2013, pp. 35088-(14) - 35088-(25).
- [130] *Despacho normativo n.º1-B/2017*, Gabinetes da Secretária de Estado Adjunta e da Educação e do Secretário de Estado da Educação. Diário da República, 2.ª serie- N.º75- 17 de abril de 2017, pp. 7304-(2) - 7304-(8). 2017.
- [131] A. Pinto, "Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS," ed. Lisboa: LNEC, 2014.







**A1**

**FOLHA DE CÁLCULO RECS**

Cálculo RECS- Situação Inicial

NUT III	Município	$z_{ref}$ (m)	$z$ (m)	Zona Climática
Ave	Guimarães	426	202	I2, V2

GD		M		$\Theta_{ext,i}$		$\Theta_{ext,v}$	
$GD_{ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)	$M_{ref}$ (meses)	$a$ (mês/km)	$\Theta_{ext,i,ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)	$\Theta_{ext,v,ref}$ (°C)	$a$ (°C/km)
1653	1500	7,2	0	7,8	-6	20,8	-3
1317		7,2		9,1		21,5	

Dimensões da sala			
Comprimento (m)	8,000	Ap (m²)	48,000
Largura (m)	6,000	Volume (m³)	168,00
Pé-direito (m)	3,500	Perímetro (m)	28,000

Envolvente exterior

Parede exterior (PE1)	$e$ (m)	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$R$ [(m².°C)/W]	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60
Rse			0,040	Uref [W/(m².°C)]	0,600
Reboco exterior	0,025	1,300	0,019	Ureal [W/(m².°C)]	3,487
Granito	0,230	2,800	0,082	Ai (m²)	10,968
Reboco interior	0,020	1,300	0,015	Uref. Ai [W/°C]	6,581
Rsi			0,130	Ureal. Ai [W/°C]	38,247

Parede exterior (PE2)	$e$ (m)	$\lambda$ [W/(m.°C)]	$R$ [(m².°C)/W]	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60
Rse			0,040	Uref [W/(m².°C)]	0,600
Reboco exterior	0,025	1,300	0,019	Ureal [W/(m².°C)]	1,149
Granito	0,230	2,800	0,082	Ai (m²)	8,000
Placa de couro	0,035	0,060	0,583	Uref. Ai [W/°C]	4,800
Reboco interior	0,020	1,300	0,015	Ureal. Ai [W/°C]	9,194
Rsi			0,130		

Vãos Envidraçados (VE)	Comprimento (m)	Altura (m)	Área (m²)	Uw [W/(m².°C)]	Uref [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]
VE1 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE1 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
VE2 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE2 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
VE3 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE3 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
Total						29,807	38,700

Pontes térmicas lineares		Despacho 15793-K/2013			
(PTL1) Fachada com pav.térreo	$\psi_{ref}$	$\psi_j$	$B_j$ (m)	$\psi_{ref}.B_j$	$\psi_j.B_j$
	0,50	0,80	8,00	4,00	6,40
		Despacho 15793-E/2013			
(PTL2) Fachada com pav.intermédio	0,50	0,70	8,00	4,00	5,60
(PTL3) Fachada com caixilharia	0,20	0,30	20,94	4,19	6,28
Total				12,188	18,282

$$H_{ext,ref} = \sum_i [U_{ref}.Ai] + \sum_j [\psi_j.B_j]$$

Hext,ref [W/°C]*	72,057
------------------	--------

$$H_{ext} = \sum_i [U.Ai] + \sum_j [\psi_j.B_j]$$

Hext [W/°C]*	140,972
--------------	---------

\* Valor majorado em 35% a fim de contabilizar o valor das pontes térmicas planas (de acordo com a Portaria n.º 349-D/2013)

Envolvente em contacto com espaços não úteis

Parede interior (PI1+PI2)	e (m)	$\lambda$ [W/(m.°C)]	R [(m².°C)/W]		PI1	PI2	
Rse			0,04	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60		
Reboco	0,020	1,30	0,02	Uref [W/(m².°C)]	0,600	0,600	
Granito	0,230	2,80	0,08	Ureal [W/(m².°C)]	2,373	2,373	
Reboco	0,200	1,30	0,15	Ai (m²)	28,000	19,000	Total
Rsi			0,13	Uref. Ai [W/°C]	16,800	11,400	28,200
				Ureal. Ai [W/°C]	66,449	27,054	93,504

Vão Opaco (VO1)	Área	Uref [W/(m².°C)]	Ureal [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]
Porta	2,000	0,600	3,500	1,200	7,000

Espaço não útil	Ai	Au	Venu	Ai/Au	btr
Hall	19,000	31,920	88,200	0,595	0,800
Miniginásio	28,000	43,175	154,635	0,649	0,800

	btr	Ai	Uref [W/(m².°C)]	Ureal [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]	btr.Uref. Ai	btr.Ureal. Ai
PI1	0,800	28,000	0,600	2,373	16,800	66,449	13,440	53,159
PI2	0,800	19,000	0,600	2,373	11,400	45,091	9,120	36,072
VO1	0,800	2,000	0,600	3,500	1,200	7,000	0,960	5,600

$$Henu = btr \times (\sum_i [Urefi \cdot Ai] + \sum_j [\psi j \cdot Bj])$$

Henu,ref [W/°C]	23,52
-----------------	-------

$$Henu = btr \times (\sum_i [Ui \cdot Ai] + \sum_j [\psi j \cdot Bj])$$

Henu [W/°C]	94,83
-------------	-------

Envolvente em contacto com o solo

$$B' = \frac{Ap}{0,5P}$$

B' (m)	3,43
--------	------

Despacho 15793-E/2013	
z (m)	<1
Rf [(m².°C)/m]	<0,75
Ubf [W/(m².°C)]	1
Ai	48,000

$$Hecs = \sum_i [Ubf i \cdot Ai] + \sum_j [zj \cdot Pj \cdot Ubw j]$$

Hecs,ref [W/°C]	48,00
-----------------	-------

Hecs [W/°C]	48,00
-------------	-------

Transferência de calor por transmissão através da envolvente

$$Htr,ref = Hext,ref + Henu,ref + Hecs,ref$$

Htr,ref [W/°C]	143,58
----------------	--------

$$Htr = Hext + Henu + Hecs$$

Htr [W/°C]	283,80
------------	--------

$$Qtr,ref = 0,024 \cdot GD,ref \cdot Htr,ref$$

Qtr,ref [kWh]	5695,98
---------------	---------

$$Qtr = 0,024 \cdot GD \cdot Htr$$

Qtr [kWh]	8970,47
-----------	---------

Perdas de calor por ventilação

Q [m³/(horas.pessoa)]	24
Alunos + Professor	25
Volume	168,00

$R_{ph} = \frac{Q}{V}$

Rph	3,57
-----	------

$H_{ve,ref} = 0,34 . R_{ph,ref} . Ap . Pd$

Hve, ref [W/°C]	204,00
-----------------	--------

$Q_{ve,ref} = 0,024 . GD . ref . H_{ve,ref}$

Qve, ref [kWh]	8093,09
----------------	---------

Caudal mínimo de ar novo real [m³/h]	126
Volume	168,00

$R_{ph} = \frac{\text{Caudal mínimo de ar novo}}{V}$

Rph	0,75
-----	------

$H_{ve} = 0,34 . R_{ph} . Ap . Pd$

Hve [W/°C]	42,84
------------	-------

$Q_{ve,} = 0,024 . GD . H_{ve}$

Qve [kWh]	1354,09
-----------	---------

Ganhos térmicos úteis

qint [W/m²]	7
Mref (meses)	7,2

$Q_{int,ref} = 0,72 . qint . M_{ref} . Ap$

Qint, ref [kWh]	1741,82
-----------------	---------

Gsul [kWh/m²]	125
---------------	-----

qint [W/m²]	7
M (meses)	7,2

$Q_{int,ref} = 0,72 . qint . M_{ref} . Ap$

Qint [kWh]	1741,82
------------	---------

VE	Xj	FS	Fh	Fo.Ff	Fg	Fw	$g_{\perp,vi}$	gi	Aw	As,inj	Fs.As,inj
VE1	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141
VE2	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141
VE3	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141

$F_S=F_h.F_o.F_f \qquad A_{si,nj} = A_w . F_g . g_i$

$Q_{sol}= G_{sul} . 0,182 . 0,2Ap$

Qsol,ref [kWh]	218,40
----------------	--------

$Q_g,ref = Q_{int,ref} + Q_{sol,ref}$

Qg, ref [kWh]	1960,22
---------------	---------

$Q_{sol}= G_{sul} . \sum [X_j . \sum F_s . A_s] . M$

Qsol [kWh]	1725,70
------------	---------

$Q_g = Q_{int} + Q_{sol}$

Qg [kWh]	3467,52
----------	---------

$\gamma = \frac{Q_g}{(Q_{tr} + Q_{ve})}$

γ	0,34
---	------

$\eta = \frac{1 - \gamma^d}{1 - \gamma^{d+1}}$

a	4,2
η	0,99

$Q_{gu} = \eta . Q_g$

Qgu, ref [kWh]	3443,88
----------------	---------

ηref	0,60
------	------

$Q_{gu,ref} = \eta_{ref} . Q_{g,ref}$

Qgu, ref [kWh]	1176,13
----------------	---------

Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício

$$Ni = \frac{(Q_{tr,ref} + Q_{ve,ref} - Q_{gu,ref})}{Ap}$$

Ni [kWh/m².ano]	262,77
-----------------	--------

$$Nic = \frac{(Q_{tr} + Q_{ve} - Q_{gu})}{Ap}$$

Nic [kWh/m².ano]	143,35
------------------	--------

Nic ≤ Ni	Verifica
----------	----------

Inércia Térmica- Situação Inicial

EL1 - Elementos da envolvente exterior

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
PE1	10,968	341,750	150,000	1,000	1645,200
PE2	8,000	0,000	0,000	1,000	0,000
Total					1645,200

EL1 - Elementos da envolvente interior

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
PI1	28,000	337,000	150,000	1,000	4200,000
PI2	19,000	337,000	150,000	1,000	2850,000
Total					7050,000

EL1 - Elementos em contacto com outra fração autónoma

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
Reboco 0,02 m + Granito 0,23 m + Reboco 0,02 m	21,000	337,000	150,000	1,000	3150,000
Pavimento intermédio	48,000	139,500	139,500	1,000	6696,000
Total					9846,000

EL2 - Elementos em contacto com o solo

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
Pav1	48,000	150,000	150,000	1,000	7200,000
Total					7200,000

ΣSi.Msi.r	25741,200
Ap	48,000
It	536,275
Forte	

Massa dos elementos construtivos	Massa volúmica [kg/m³]	e [m]	Mt [kg/m²]
Reboco tradicional	1900	0,020	38,00
		0,025	47,50
Granito	2600	0,230	598,00
Placa de Couro	714	0,035	25,00
Laje aligeirada	1500	0,150	225,00
Soalho	800	0,020	16,00
Material de desperdício	208	0,050	10,40

**Cálculo RECS- Situação Final**

NUT III	Município	Z <sub>ref</sub> (m)	z (m)	Zona Climática
Ave	Guimarães	426	202	I2, V2

GD		M		Θ <sub>ext,i</sub>		Θ <sub>ext,v</sub>	
GD <sub>ref</sub> (°C)	a (°C/km)	M <sub>ref</sub> (meses)	a (mês/km)	Θ <sub>ext,i,ref</sub> (°C)	a (°C/km)	Θ <sub>ext,v,ref</sub> (°C)	a (°C/km)
1653	1500	7,2	0	7,8	-6	20,8	-3
1317		7,2		9,1		21,5	

Dimensões da sala			
Comprimento (m)	8,000	Ap (m²)	48,000
Largura (m)	6,000	Volume (m³)	168,00
Pé-direito (m)	3,500	Perímetro (m)	28,000

**Envoltente exterior**

Parede exterior (PE1)	e (m)	λ [W/(m.°C)]	R [(m².°C)/W]		
Rse			0,040	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60
Reboco exterior	0,025	1,300	0,019	Uref [W/(m².°C)]	0,600
Granito	0,230	2,800	0,082	Ureal [W/(m².°C)]	1,059
Reboco interior	0,020	1,300	0,015	Ai (m²)	10,968
Material de desperdício	0,050	0,076	0,658	Uref. Ai [W/°C]	6,581
Rsi			0,130	Ureal. Ai [W/°C]	11,610

Parede exterior (PE2)	e (m)	λ [W/(m.°C)]	R [(m².°C)/W]		
Rse			0,040	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60
Reboco exterior	0,025	1,300	0,019	Uref [W/(m².°C)]	0,600
Granito	0,230	2,800	0,082	Ureal [W/(m².°C)]	1,149
Placa de couro	0,035	0,060	0,583	Ai (m²)	8,000
Reboco interior	0,020	1,300	0,015	Uref. Ai [W/°C]	4,800
Rsi			0,130	Ureal. Ai [W/°C]	9,194

Vãos Envidraçados (VE)	Comprimento (m)	Altura (m)	Área (m²)	Uw [W/(m².°C)]	Uref [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]
VE1 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE1 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
VE2 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE2 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
VE3 (correr)	1,930	1,000	1,930	4,500	3,300	6,369	8,685
VE3 (fixa)	1,930	0,560	1,081	3,900	3,300	3,567	4,215
<b>Total</b>						29,807	38,700

Despacho 15793-K/2013					
Pontes térmicas lineares	ψ <sub>ref</sub>	ψ <sub>j</sub>	B <sub>j</sub> (m)	ψ <sub>ref</sub> .B <sub>j</sub>	ψ <sub>j</sub> .B <sub>j</sub>
(PTL1) Fachada com pav.térreo	0,50	0,80	8,000	4,000	6,400
(PTL2) Fachada com pav.intermédio	0,50	0,60	8,000	4,000	4,800
(PTL3) Fachada com caixilharia	0,20	0,25	20,940	4,188	5,235
<b>Total</b>				12,188	16,435

$$H_{ext,ref} = \sum_i [U_{ref}.Ai] + \sum_j [\psi_j.B_j]$$

$$H_{ext} = \sum_i [U.Ai] + \sum_j [\psi_j.B_j]$$

<b>Hext,ref [W/°C]*</b>	72,057
-------------------------	--------

<b>Hext [W/°C]*</b>	102,519
---------------------	---------

\* Valor majorado em 35% a fim de contabilizar o valor das pontes térmicas planas (de acordo com a Portaria n.º 349-D/2013)

Envolvente em contacto com espaços não úteis

Parede interior (PI1+PI2)	e (m)	λ [W/(m.°C)]	R [(m².°C)/W]		PI1	PI2	
Rse			0,04	Umáx. [W/(m².°C)]	1,60		
Reboco	0,020	1,30	0,02	Uref [W/(m².°C)]	0,600	0,600	
Granito	0,230	2,80	0,08	Ureal [W/(m².°C)]	2,373	2,373	
Reboco	0,200	1,30	0,15	Ai (m²)	28,000	19,000	Total
Rsi			0,13	Uref. Ai [W/°C]	16,800	11,400	28,200
				Ureal. Ai [W/°C]	66,449	27,054	93,504

Vão Opaco (VO1)	Área	Uref [W/(m².°C)]	Ureal [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]
Porta	2,000	0,600	3,000	1,200	6,000

Espaço não útil	Ai	Au	Venu	Ai/Au	btr
Hall	19,000	31,920	88,200	0,595	0,800
Miniginásio	28,000	43,175	154,635	0,649	0,800

	btr	Ai	Uref [W/(m².°C)]	Ureal [W/(m².°C)]	Uref. Ai [W/°C]	Ureal. Ai [W/°C]	btr.Uref. Ai	btr.Ureal. Ai
PI1	0,800	28,000	0,600	2,373	16,800	66,449	13,440	53,159
PI2	0,800	19,000	0,600	2,373	11,400	45,091	9,120	36,072
VO1	0,800	2,000	0,600	3,000	1,200	6,000	0,960	4,800

$$Henu = btr \times (\sum_i [Uref.i.Ai] + \sum_j [\psi.j.Bj])$$

Henu,ref [W/°C]	23,52
-----------------	-------

$$Henu = btr \times (\sum_i [Ui.Ai] + \sum_j [\psi.j.Bj])$$

Henu [W/°C]	94,03
-------------	-------

Envolvente em contacto com o solo

$$B' = \frac{Ap}{0,5P}$$

B' (m)	3,43
--------	------

Despacho 15793-E/2013	
z (m)	<1
Rf [(m².°C)/m]	<0,75
Ubf [W/(m².°C)]	1
Ai	48,000

$$Hecs = \sum_i [Ubf.i.Ai] + \sum_j [zj.Pj.Ubwj]$$

Hecs,ref [W/°C]	48,00
-----------------	-------

Hecs [W/°C]	48,00
-------------	-------

Transferência de calor por transmissão através da envolvente

$$Htr,ref = Hext,ref + Henu,ref + Hecs,ref$$

Htr,ref [W/°C]	143,58
----------------	--------

$$Htr = Hext + Henu + Hecs$$

Htr [W/°C]	244,55
------------	--------

$$Qtr,ref = 0,024.GD,ref.Htr,ref$$

Qtr,ref [kWh]	5695,98
---------------	---------

$$Qtr = 0,024.GD.Htr$$

Qtr [kWh]	7729,77
-----------	---------



Perdas de calor por ventilação

Q [m³/(horas.pessoa)]	24
Alunos + Professor	25
Volume	168,00

$$Rph = \frac{Q}{V}$$

Rph	3,57
-----	------

$$Hve,ref = 0,34 \cdot Rph,ref \cdot Ap \cdot Pd$$

Hve, ref [W/°C]	204,00
-----------------	--------

$$Qve,ref = 0,024 \cdot GD,ref \cdot Hve,ref$$

Qve, ref [kWh]	8093,09
----------------	---------

Caudal mínimo de ar novo real [m³/h]	109
Volume	168,00

$$Rph = \frac{\text{Caudal mínimo de ar novo}}{V}$$

Rph	0,65
-----	------

$$Hve = 0,34 \cdot Rph \cdot Ap \cdot Pd$$

Hve [W/°C]	37,06
------------	-------

$$Qve, = 0,024 \cdot GD \cdot Hve$$

Qve [kWh]	1171,39
-----------	---------

Ganhos térmicos úteis

qint [W/m²]	7
Mref (meses)	7,2

$$Qint,ref = 0,72 \cdot qint \cdot Mref \cdot Ap$$

Qint, ref [kWh]	1741,82
-----------------	---------

Gsul [kWh/m²]	125
---------------	-----

qint [W/m²]	7
M (meses)	7,2

$$Qint,ref = 0,72 \cdot qint \cdot Mref \cdot Ap$$

Qint [kWh]	1741,82
------------	---------

VE	Xj	FS	Fh	Fo.Ff	Fg	Fw	$g_{\perp,vi}$	gi	Aw	As,inj	Fs.As,inj
VE1	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141
VE2	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141
VE3	0,560	0,900	1,000	0,900	0,600	0,900	0,780	0,702	3,011	1,268	1,141

$$Fs=Fh \cdot Fo.Ff \quad Asi,nj = Aw \cdot Fg \cdot gi$$

$$Qsol= Gsul \cdot 0,182 \cdot 0,2Ap$$

Qsol,ref [kWh]	218,40
----------------	--------

$$Qg,ref = Qint,ref + Qsol,ref$$

Qg, ref [kWh]	1960,22
---------------	---------

ηref	0,60
------	------

$$Qgu,ref = \eta_{ref} \cdot Qg,ref$$

Qgu, ref [kWh]	1176,13
----------------	---------

$$Qsol= Gsul \cdot \sum [Xj \cdot \sum Fs \cdot As] \cdot M$$

Qsol [kWh]	1725,70
------------	---------

$$Qg = Qint + Qsol$$

Qg [kWh]	3467,52
----------	---------

$$\gamma = \frac{Qg}{(Qtr + Qve)}$$

γ	0,39
---	------

$$\eta = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{a+1}}$$

a	4,2
η	0,99

$$Qgu = \eta \cdot Qg$$

Qgu, ref [kWh]	3426,85
----------------	---------

Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício

$$N_i = \frac{(Q_{tr,ref} + Q_{ve,ref} - Q_{gu,ref})}{A_p}$$

Ni [kWh/m².ano]	262,77
-----------------	--------

$$N_{ic} = \frac{(Q_{tr} + Q_{ve} - Q_{gu})}{A_p}$$

Nic [kWh/m².ano]	114,05
------------------	--------

$N_{ic} \leq N_i$	Verifica
-------------------	----------

Inércia Térmica- Situação Final

EL1 - Elementos da envolvente exterior

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
PE1	10,968	0,000	0,000	1,000	0,000
PE2	8,000	0,000	0,000	1,000	0,000
				Total	0,000

EL1 - Elementos da envolvente interior

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
PI1	28,000	337,000	150,000	1,000	4200,000
PI2	19,000	337,000	150,000	1,000	2850,000
				Total	7050,000

EL1 - Elementos em contacto com outra fração autónoma

	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
Reboco 0,02 m + Granito 0,23 m + Reboco 0,02 m	21,000	337,000	150,000	1,000	3150,000
Pavimento intermédio	48,000	139,500	139,500	1,000	6696,000
				Total	9846,000

EL2 - Elementos em contacto com o solo


	Área (Si)	Massa Total	Msi	r	Si.Msi.r
Pav1	48,000	150,000	150,000	1,000	7200,000
				Total	7200,000


ΣSi.Msi.r	24096,000
Ap	48,000
It	502,000
Forte	

Massa dos elementos construtivos	Massa volúmica [kg/m³]	e [m]	Mt [kg/m²]
Reboco tradicional	1900	0,020	38,00
		0,025	47,50
Granito	2600	0,230	598,00
Placa de Couro	714	0,035	25,00
Laje aligeirada	1500	0,150	225,00
Soalho	800	0,020	16,00
Material de desperdício	208	0,050	10,40

**A2**

**VENTILAÇÃO**

 <b>LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL</b>		<b>Aplicação LNEC Ventilação REH e RECS</b>		Aplicação desenvolvida por: Armando Pinto. apinto@lneec.pt  Ferramenta de cálculo citada no n.º3, do ponto 12.1, do despacho n.º 15793-K/2013.																									
Pinto, A. - Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS. Lisboa, LNEC, 2014. v2.0a, 2014-02-12																													
<b>1. Enquadramento do edifício</b>																													
Tipo de edifício	PES existente																												
Local (município)	GUIMARÃES																												
Região	A																												
Rugosidade	II																												
Altitude do local (m)	202																												
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	1																												
Existem edifícios/obstáculos à frente das fachadas?	Não																												
Altura do edifício ( $H_{edif}$ ) em m	7																												
Altura da fração ( $H_{FA}$ ) em m	3,5																												
Caudal mínimo PES (m³/h)	600																												
<table border="1"> <tr> <td>Área útil (m²):</td> <td>48,0</td> </tr> <tr> <td>Pd (m):</td> <td>3,50</td> </tr> <tr> <td>N.º de pisos da fração</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Velocidade vento</td> <td>Defeito REH</td> </tr> <tr> <td>Vento (<math>u_{10REH}</math>: 3,6) (m/s)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Vol (m³):</td> <td>168</td> </tr> <tr> <td>Texterior (°C)</td> <td>9,1</td> </tr> <tr> <td>Zref (m)</td> <td>426</td> </tr> <tr> <td>Aenv/Au:</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>Proteção do edifício:</td> <td><b>Desprotegido</b></td> </tr> <tr> <td>Zona da fachada:</td> <td><b>Inferior</b></td> </tr> <tr> <td>Rph mínimo PES (h-1)</td> <td>3,57</td> </tr> </table>						Área útil (m²):	48,0	Pd (m):	3,50	N.º de pisos da fração	1	Velocidade vento	Defeito REH	Vento ( $u_{10REH}$ : 3,6) (m/s)		Vol (m³):	168	Texterior (°C)	9,1	Zref (m)	426	Aenv/Au:	19%	Proteção do edifício:	<b>Desprotegido</b>	Zona da fachada:	<b>Inferior</b>	Rph mínimo PES (h-1)	3,57
Área útil (m²):	48,0																												
Pd (m):	3,50																												
N.º de pisos da fração	1																												
Velocidade vento	Defeito REH																												
Vento ( $u_{10REH}$ : 3,6) (m/s)																													
Vol (m³):	168																												
Texterior (°C)	9,1																												
Zref (m)	426																												
Aenv/Au:	19%																												
Proteção do edifício:	<b>Desprotegido</b>																												
Zona da fachada:	<b>Inferior</b>																												
Rph mínimo PES (h-1)	3,57																												
<b>2. Permeabilidade ao ar da envolvente</b>																													
Foi medido valor n50	Não																												
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos:																													
Área dos vãos (m²)	3	3	3	0																									
Classe de permeabilidade ao ar caix (janelas/portas)	2	2	2	2																									
Permeabilidade ao ar das caixas de estore	Não tem	Não tem	Não tem	Não tem																									
<b>3. Aberturas de admissão de ar na envolvente</b>																													
Tem aberturas de admissão de ar na envolvente	Sim																												
Tipo de abertura	Fixa ou regulável manualmente	Auto-regulável a 2 Pa	Auto-regulável a 10 Pa	Auto-regulável a 20 Pa																									
Área livre das aberturas fixas (cm²) / Caudal Nominal aberturas auto-reguláveis (m³/h)	1544	0	0	0																									
<b>4. Condutas de ventilação natural, condutas com exaustores/ventax que não obturam o escoamento de ar pela conduta</b>																													
Condutas de ventilação natural sem obstruções significativas (por exemplo, consideram-se obstruções significativas exaustores com filtros que anulam escoamento de ar natural para a conduta)	Não	Não	Não	Não																									
Escoamento de ar																													
Perda de carga																													
Altura da conduta (m)																													
Cobertura																													
Número de condutas semelhantes																													
<b>5. Exaustão ou insuflação por meios mecânicos de funcionamento prolongado</b>																													
Existem meios mecânicos (excluindo exaustores ou ventax)	Não																												
Escoamento de ar																													
Caudal nominal (m³/h)																													
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento																													
Pressão total (Pa)																													
Rendimento total do ventilador(%)																													
Tem sistema de recuperação de calor																													
Rendimento da recuperação de calor (%)																													
<b>6. Exaustão ou insuflação por meios híbridos de baixa pressão (&lt; 20 Pa)</b>																													
Existem meios híbridos	Não																												
Escoamento de ar																													
Caudal nominal (m³/h)																													
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento																													
Pressão total (Pa)																													
Rendimento total do ventilador(%)																													
<b>7. Verão - Recuperador de calor</b>																													
<b>8. Resultados</b>																													
<b>8.1 - Balanço de Energia - Edifício</b>																													
		PES <span style="float: right;">ok</span>																											
		<b>Situação de ventilação natural</b>																											
		Caudal de ventilação natural: Valor método prescritivo																											
<b>8.3 - Caudal mínimo de ventilação</b>																													
Caudal de ar do sistema	126 (m³/h)																												
Requisito mínimo de ventilação Edif. Novos	600 (m³/h)																												
Critério de caudal mínimo de ar novo	Ponderar medidas de melhoria do sistema de ventilação.																												
Nota: No Cálculo de Rph min em edifícios novos e grandes reabilitações não é considerado o efeito de janelas sem classificação, da classe 1 e 2 e a existência de caixas de estore.																													
Técnico: _____ Data: 04/06/2018																													

 <b>LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL</b>		<b>Aplicação LNEC Ventilação REH e RECS</b>		Aplicação desenvolvida por: Armando Pinto. apinto@lneec.pt  Ferramenta de cálculo citada no n.º3, do ponto 12.1, do despacho n.º 15793-K/2013.																									
Pinto, A. - Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS. Lisboa, LNEC, 2014. v2.0a, 2014-02-12																													
<b>1. Enquadramento do edifício</b>																													
Tipo de edifício	PES existente																												
Local (município)	GUIMARÃES																												
Região	A																												
Rugosidade	II																												
Altitude do local (m)	202																												
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)	1																												
Existem edifícios/obstáculos à frente das fachadas?	Não																												
Altura do edifício (H <sub>edif</sub> ) em m	7																												
Altura da fração (H <sub>FA</sub> ) em m	3,5																												
Caudal mínimo PES (m³/h)	600																												
<table border="1"> <tr> <td>Área útil (m²):</td> <td>48,0</td> </tr> <tr> <td>Pd (m):</td> <td>3,50</td> </tr> <tr> <td>N.º de pisos da fração</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Velocidade vento</td> <td>Defeito REH</td> </tr> <tr> <td>Vento (u10REH: 3,6) (m/s)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Vol (m³):</td> <td>168</td> </tr> <tr> <td>Texterior (°C)</td> <td>9,1</td> </tr> <tr> <td>Zref (m)</td> <td>426</td> </tr> <tr> <td>Aenv/Au:</td> <td>19%</td> </tr> <tr> <td>Proteção do edifício:</td> <td><b>Desprotegido</b></td> </tr> <tr> <td>Zona da fachada:</td> <td><b>Inferior</b></td> </tr> <tr> <td>Rph mínimo PES (h-1)</td> <td>3,57</td> </tr> </table>						Área útil (m²):	48,0	Pd (m):	3,50	N.º de pisos da fração	1	Velocidade vento	Defeito REH	Vento (u10REH: 3,6) (m/s)		Vol (m³):	168	Texterior (°C)	9,1	Zref (m)	426	Aenv/Au:	19%	Proteção do edifício:	<b>Desprotegido</b>	Zona da fachada:	<b>Inferior</b>	Rph mínimo PES (h-1)	3,57
Área útil (m²):	48,0																												
Pd (m):	3,50																												
N.º de pisos da fração	1																												
Velocidade vento	Defeito REH																												
Vento (u10REH: 3,6) (m/s)																													
Vol (m³):	168																												
Texterior (°C)	9,1																												
Zref (m)	426																												
Aenv/Au:	19%																												
Proteção do edifício:	<b>Desprotegido</b>																												
Zona da fachada:	<b>Inferior</b>																												
Rph mínimo PES (h-1)	3,57																												
<b>2. Permeabilidade ao ar da envolvente</b>																													
Foi medido valor n50	Não																												
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos:																													
Área dos vãos (m²)	3	3	3	0																									
Classe de permeabilidade ao ar caix (janelas/portas)	2	2	2	2																									
Permeabilidade ao ar das caixas de estore	Não tem	Não tem	Não tem	Não tem																									
<b>3. Aberturas de admissão de ar na envolvente</b>																													
Tem aberturas de admissão de ar na envolvente	Sim																												
Tipo de abertura	Fixa ou regulável manualmente	Auto-regulável a 2 Pa	Auto-regulável a 10 Pa	Auto-regulável a 20 Pa																									
Área livre das aberturas fixas (cm²) / Caudal Nominal aberturas auto-reguláveis (m³/h)	1344	0	0	0																									
<b>4. Condutas de ventilação natural, condutas com exaustores/ventax que não obturam o escoamento de ar pela conduta</b>																													
Condutas de ventilação natural sem obstruções significativas (por exemplo, consideram-se obstruções significativas exaustores com filtros que anulam escoamento de ar natural para a conduta)	Não	Não	Não	Não																									
Escoamento de ar																													
Perda de carga																													
Altura da conduta (m)																													
Cobertura																													
Número de condutas semelhantes																													
<b>5. Exaustão ou insuflação por meios mecânicos de funcionamento prolongado</b>																													
Existem meios mecânicos (excluindo exaustores ou ventax)	Não																												
Escoamento de ar																													
Caudal nominal (m³/h)																													
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento																													
Pressão total (Pa)																													
Rendimento total do ventilador(%)																													
Tem sistema de recuperação de calor																													
Rendimento da recuperação de calor (%)																													
<b>6. Exaustão ou insuflação por meios híbridos de baixa pressão (&lt; 20 Pa)</b>																													
Existem meios híbridos	Não																												
Escoamento de ar																													
Caudal nominal (m³/h)																													
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento																													
Pressão total (Pa)																													
Rendimento total do ventilador(%)																													
<b>7. Verão - Recuperador de calor</b>																													
<b>8. Resultados</b>																													
<b>8.1 - Balanço de Energia - Edifício</b>																													
		PES <span style="float: right;">ok</span>																											
		<b>Situação de ventilação natural</b>																											
		Caudal de ventilação natural: Valor método prescritivo																											
<b>8.3 - Caudal mínimo de ventilação</b>																													
Caudal de ar do sistema		109 (m³/h)																											
Requisito mínimo de ventilação Edif. Novos		600 (m³/h)																											
Critério de caudal mínimo de ar novo		<b>Ponderar medidas de melhoria do sistema de ventilação.</b>																											
Nota: No Cálculo de Rph min em edifícios novos e grandes reabilitações não é considerado o efeito de janelas sem classificação, da classe 1 e 2 e a existência de caixas de estore.																													
Técnico: _____ Data: _____ 04/06/2018																													